



Sveučilište u Zagrebu

Grafički fakultet

Ivana Ljevak

**STANDARDIZACIJA KORELATIVNIH
PARAMETARA KOEFICIJENTA
FRIKCIJE I KVALITETE TISKA
TERMOSKUPLJAJUĆIH ETIKETA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2021.



Sveučilište u Zagrebu

Grafički fakultet

Ivana Ljevak

**STANDARDIZACIJA KORELATIVNIH
PARAMETARA KOEFICIJENTA
FRIKCIJE I KVALITETE TISKA
TERMOSKUPLJAJUĆIH ETIKETA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2021.



Sveučilište u Zagrebu

Grafički fakultet

Ivana Ljevak

**STANDARDIZACIJA KORELATIVNIH
PARAMETARA KOEFICIJENTA
FRIKCIJE I KVALITETE TISKA
TERMOSKUPLJAJUĆIH ETIKETA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Igor Zjakić

Zagreb, 2021.



University of Zagreb

Faculty of Graphic Arts

Ivana Ljevak

**STANDARDIZATION OF THE
CORRELATIVE PARAMETERS
RELATED ON THE FRICTION
COEFFICIENT AND THE QUALITY OF
PRINTED THERMOSHRINKING LABELS**

DOCTORAL THESIS

Supervisor: Associate Professor Igor Zjakić

Zagreb, 2021.

UDK 621.798:655.326.1:535.6

Imenovano Povjerenstvo za ocjenu doktorskoga rada:

1. prof. dr. sc. Nikola Mrvac, Sveučilište u Zagrebu Grafički fakultet, predsjednik
2. izv. prof. dr. sc. Dubravko Banić, Sveučilište u Zagrebu Grafički fakultet, član
3. izv. prof. dr. sc. Mario Barišić, Sveučilište Sjever, Koprivnica, vanjski član

Imenovano Povjerenstvo za obranu doktorskoga rada:

1. prof. dr. sc. Nikola Mrvac, Sveučilište u Zagrebu Grafički fakultet, predsjednik
2. izv. prof. dr. sc. Dubravko Banić, Sveučilište u Zagrebu Grafički fakultet, član
3. izv. prof. dr. sc. Mario Barišić, Sveučilište Sjever, Koprivnica, vanjski član
4. doc. dr. sc. Miroslav Mikota, Sveučilište u Zagrebu Grafički fakultet, zamjenski član
5. izv. prof. dr. sc. Martinia Ira Glogar, Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, zamjenska vanjska članica

Mentor: izv. prof. dr. sc. Igor Zjakić, Sveučilište u Zagrebu Grafički fakultet

Datum obrane doktorskoga rada: 17. veljače 2021.

Mjesto obrane doktorskoga rada: Sveučilište u Zagrebu Grafički fakultet

Povjerenstvo za obranu doktorskoga rada donijelo je sljedeću odluku:

„Obranila s ocjenom summa cum laude (*s najvećom pohvalom*) jednoglasnom odlukom Povjerenstva“

Životopis mentora

Diplomirao na Grafičkom fakultetu nakon završene srednje Grafičke škole, smjer Tisak. 2000. godine upisuje poslijediplomski studij na Grafičkom fakultetu i 2002. godine postaje prvi magistar znanosti Grafičke tehnologije u Hrvatskoj. U siječnju 2005. godine doktorira na katedri Tisak na Grafičkom fakultetu s temom: "Optimizacija sustava rasterske reprodukcije utisku".

Od 1993. godine radi u tiskari "Graf" kao direktor, zatim u tiskari "AKD" kao voditelj pogona i kontrolor tehnološkog procesa te kao direktor tiskare. Sudjeluje u projektu izrade nove Hrvatske putovnice i ostalih zaštićenih dokumenata. Prije dolaska na fakultet radio je kao menadžer za tiskarske sustave u kompaniji Xerox. Od 2001. godine radi na Grafičkom fakultetu gdje postaje docent na katedri Tisak te izvanredni profesor.

Do danas je objavio više od 70 znanstvenih i stručnih radova iz Grafičke tehnologije te je sudjelovao na mnogim međunarodnim i domaćim znanstvenim i stručnim konferencijama. Autor je i nekoliko poglavlja objavljenih u međunarodnim znanstvenim knjigama te nekoliko znanstvenih radova u međunarodnim časopisima s međunarodnom recenzijom. U svom desetogodišnjem iskustvu u privredi završio nekoliko tečajeva vezanih za grafičku tehnologiju i menadžment u Zurichu, Londonu i Budimpešti. Već nekoliko godina sudjeluje u radu znanstveno-stručnog Simpozija "Blaž Baromić" kao član Programskog i Organizacijskog odbora. Savjetnik je za kvalitetu novinskog tiska pri njemačkoj organizaciji IFRA te je voditelj projekta Sincol, vezan za standardizaciju novinskog tiska u Hrvatskoj i jugoistočnoj Europi. Predsjednik je Hrvatskog društva grafičara.

Od 2006. godine rješenjem Trgovačkog suda u Zagrebu postaje stalni sudski vještak za grafičku industriju a 2017. g. stalni sudski vještak za grafičku industriju, tiskarstvo i zaštitu od krivotvorenja dokumenata i vrijednosnica.

Napisao udžbenike iz područja grafičke tehnologije i dizajna: "Tehničko uređivanje u procesu izrade knjige", "Upravljanje kvalitetom ofsetnog tiska", "Kolorimetrija u multimedijским sustavima" i "Psihologija boja.

Na Grafičkom fakultetu nositelj je predmeta: Glavne tehnike tiska, Upravljanje ofsetnim tiskom, Tehničko uređivanje i vođenje naklade, Poslovni i zaštitni tisak, Quality Management in Printing (na engleskom jeziku) te na doktorskom studiju: Napredni tiskarski sustavi i Rasterski elementi u tisku.

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Igoru Zjakiću na pruženoj pomoći tijekom izrade ove disertacije i tvrtkama Grafpex d.o.o., Rotoplast d.o.o. na potpori u izradi eksperimentalnog dijela.

Zahvaljujem se, prije svega, svojoj obitelji koja je bila uz mene i pomogla mi ostvariti moj cilj. Veliko hvala i kolegama na Grafičkom fakultetu i prijateljima koji su me ohrabivali, vjerovali u mene i poticali me u mom naumu.

SADRŽAJ

1. UVOD	8
1.1. Pregled dosadašnjih istraživanja	8
1.2. Cilj i hipoteze istraživanja	9
1.3. Očekivani znanstveni doprinos	10
 2. TEORETSKI DIO	11
2.1. Razvoj fleksibilne ambalaže	11
2.1.1. Podjela materijala za izradu fleksibilne ambalaže	11
2.1.2. Papir i karton	12
2.1.2. Polimerni materijali	13
2.1.2.1. Poliolefini: Polietilen, Polipropilen	15
2.1.2.2. Poliesteri: Poli(etilen-teraftalat), Polikarbonati, Poli(etilen-naftalat)	18
2.1.2.3. Polistiren	21
2.1.2.4. Poli(vinil-klorid)(PVC)	22
2.1.2.5. Poliamid	23
2.1.2.6. Etilen-vinil alkohol	23
2.1.3. Višeslojne metalne folije ili laminati	24
2.2. Trenje	26
2.2.1. Koeficijent frikcije ili koeficijent trenja kao fizikalni oblik	26
2.2.2. Mehanizmi trenja	27
2.2.3. Procesi trenja	28
2.2.4. Mehanizam određivanja hrapavosti podloga u grafičkoj tehnologiji	33
2.3. Fleksotisak	34
2.3.1. Tiskovna forma kod fleksotiska	35
2.3.2. Sustav za obojenje i bojilo u fleksotisku	36
2.3.3. Tisak etiketa u fleksotisku	41
2.3.3.1. "Shrink sleeve" etiketa ili etiketiranje termoskupljajućim filmom	41
2.3.4. Kolorimetrija kod višebojne reprodukcije	42
2.3.4.1. Doživljaj boja	42
2.3.4.2. Mjerenje boja	44
2.3.4.3. Boje na ambalaži	45

3. EKSPERIMENTALNI DIO	47
3.1. Metodologija i plan istraživanja.....	47
3.1.1 Korišteni materijali	50
3.1.1.1. Tiskovna podloga.....	50
3.1.1.2. Tiskovna boja	51
3.1.1.3. Korišteni stroj	51
3.1.1.4. Korišteni uređaji za mjerenje	53
3.2. Rezultati istraživanja	55
3.2.1. Definiranje koeficijenta frikcije i rezultati istraživanja	56
3.2.2. Definiranje prirasta RTV i rezultati istraživanja.....	60
3.2.3. Definiranje gamuta reprodukcije i rezultati istraživanja.....	66
3.2.4. Definiranje opaciteta i rezultati istraživanja	75
3.2.5. Definiranje optimalnog sivog balansa i rezultati istraživanja.....	77
3.2.6. Subjektivna metoda istraživanja	86
3.3. Diskusija rezultata istraživanja.....	91
3.3.1. Koeficijent frikcije (COF) mjerenja	91
3.3.2. Prirast RTV reprodukcije mjerenja.....	92
3.3.3. Gamut reprodukcije mjerenja	93
3.3.4. Opacitet mjerenja	96
3.3.5. Optimalni sivi balans mjerenja	97
3.3.6. Subjektivno vizualno istraživanje.....	99
3.3.7. Usporedba objektivnih i subjektivnih rezultata	99
3.4. Zaključci.....	101
4. LITERATURA	104
5. POPIS SLIKA I TABLICA	108
 <i>Prilozi</i>	
Životopis i popis objavljenih radova	113

SAŽETAK

Ambalaža je kompleksan proizvod koji prolazi kroz više faza procesa kako bi se razvio konkurentan konačan proizvod. Fleksotiskarska tehnika posljednjih godina je sve značajnija tehnika tiska ambalaže te će kao takva zauzimati vrlo važnu ulogu i u budućnosti. Složenost samog procesa tiska ambalaže i odnosa s ostalim fazama proizvodnje je zanimljivo i vrlo značajno područje istraživanja. U ovoj doktorskoj disertaciji istraživala se korelacija koeficijenta frikcije kod polimerne ambalaže s kolorimetrijom boja koje su važne u proizvodnji fleksibilne polimerne ambalaže. Poseban fokus istraživanja stavljen je na reproduciranje procesnih boja koje zbog svog sastava pokazuju određenu transparentnost nakon tiska i sušenja otiska. Na osnovi dobivenih rezultata proširit će se standard i dati preporučene vrijednosti u području koeficijenta frikcije kod polimernih materijala te se očekuje kako će se dobivenim rezultatima i analizom kolorimetrijskih vrijednosti ostvariti viša kvaliteta same reprodukcije fleksotiskarskim tiskom na polimernim materijalima kod termoskupljajućih etiketa.

Ključne riječi: *ambalaža, polimerni materijali, koeficijent frikcije, fleksotisak, kolorimetrija*

ABSTRACT

In order to develop a competitive final product, packaging production has to go through several stages of a complex process. In recent years, flexographic printing has become an increasingly important packaging printing technique and it will also remain very important in the future. The complexity of the packaging printing process itself and its connection to other stages of production is an interesting and very significant area of research. In this doctoral dissertation the correlation of the coefficient of friction of polymer packaging and colorimetry of colors important in the production of flexible polymer packaging is studied. A special focus is placed on the reproduction of process colors which show some transparency after printing and drying due to their composition. Based on the results obtained the standard will be set and the recommended values will be given for coefficients of friction of polymer materials, and it is expected that the obtained results and the analysis of colorimetric values will result in better quality of flexographic printing on polymer materials with heat shrink labels.

Keywords: *packaging, polymer materials, coefficient of friction, flexographic printing, colorimetry*

1. UVOD

1.1. Pregled dosadašnjih istraživanja

U dosadašnjim eksperimentalnim radovima istraživanja su rađena u području kolorimetrije i međuodnosu s određenim procesima u tijeku tiska koji rezultiraju važnošću kvalitetne reprodukcije finalnog proizvoda. Istraživanja su obuhvaćala područje različitih metoda lakiranja i njihov utjecaj na različite tiskovne podloge [1]. To je od velikog značaja za zaštitu kako i drugih tiskanih proizvoda tako i same ambalaže. Kako na same promjene utječe i površina materijala, tako je sjajnost tiskovne podloge jedna od najvažnijih optičkih karakteristika tiskovne podloge. Hrapavost površine značajno utječe na sjajnost te se, proporcionalno s glađom površinom, postiže veća sjajnost [2,3].

Tiskovne podloge različito utječu i na kolorimetrijske promjene boja [4] te su daljnja istraživanja na području kolorimetrijskih promjena spotnih boja rađena s obzirom na druge vrste i načine lakiranja otisaka. Takvi procesi predstavljaju moguće oscilacije u obojenju te se javlja problematika PMS sustava, posebno na većim nakladama. Usprkos poboljšanju automatizacije tiskarskih strojeva te načina kontrole kvalitete otisaka, subjektivna procjena i dalje je bitno uporište te predmet brojnih istraživanja [5,6].

Dalje se istraživalo u CMYK sustavu boja na tiskovnim podlogama i razlika ΔE boja na različitim linijaturama rastera [7] i koliko one mogu utjecati na subjektivnu ocjenu promatrača [8]. Dobiveni rezultati dokazali su da se zbog različitog utjecaja parametara u tisku na samu tiskovnu podlogu reproducirani rasterski elementi razlikuju, ali u okvirima tolerancije [9]. Važno je napomenuti karakteristiku rada stroja zbog načina sušenja otisaka kojim se uvelike skraćuje brzina tiska naklade zbog UV sušenja tiskarske boje koja također utječe na informacije o transformaciji tristimulusnih vrijednosti određene boje [10].

Analiza se nakon toga vršila na materijalima koji se koriste za izradu fleksibilne ambalaže, npr. papir, polipropilen (PP) i aluminijski, a otisci su dobiveni fleksotiskarskom tehnikom tiska [11]. Kod tiskarskog procesa stroja za fleksotisak struktura površine aniloksa valjka je keramička i boju iz bojanika prenosi na povišene tiskovne elemente na polimernu tiskovnu formu [12]. Vršio se eksperiment na različitim tiskovnim podlogama polimernih materijala višeslojne strukture i monomaterijalima. Istraživanja su rezultirala da u fleksotisku prirast rastertonskih vrijednosti zavisi o međuodnosu tiskovne podloge, boje i tiskarske ploče te se treba izvršiti karakterizacija cjelokupnog sustava [13,14].

Nadalje, istraživanja na polimernim materijalima otisnutima fleksotiskarskim procesom radila su se na višeslojnim polimernim materijalima laminatima [15]. Istraživanje je usmjereno prema optimalnoj kvaliteti procesa proizvodnje ambalaže kako bi se zadovoljili svi preduvjeti implementiranja na poluproizvod kod pakiranja te izbjegle poteškoće i mogući zastoji na samom stroju za pakiranje. Analizirao se koeficijent frikcije (COF) koji je vrijednost koja služi da se zadovolji norma kako će budući fleksibilni ambalažni materijal kliziti i kretati se na stroju za pakiranje [16,17,18,19,20].

Polimerni materijali su materijali budućnosti koji su zamijenili različite materijale zbog svog širokog spektra svojstava. Velika je primjena transparentnih fleksibilnih pakiranja na raznim polimernim materijalima [21,22]. Tako se dalje istraživao odnos $L*a*b^*$ vrijednosti procesnih boja i dobivenog koeficijenta frikcije materijala mjerenjem te su se iz analiza rezultata mogle vidjeti razlike u odstupanju otisnute boje prilikom uspoređivanja uzoraka [23].

Tijekom istraživanja područje interesa se sve više nalazilo u području fleksibilne ambalaže radi svoje pojave ponašanja u odnosu kolorimetrije boja i njihovom gustoćom obojenja čiji konačni rezultati su uvjetovani nekim drugim procesima u samom načinu njihove izrade.

1.2. Cilj i hipoteze istraživanja

Cilj istraživanja je ustanoviti u kolikoj mjeri dolazi do kolorimetrijskih promjena te subjektivne procjene kvalitete kod reproduciranja procesnih boja kod nanošenja različitih gustoća obojenja klizne bijele boje te razjasniti na koji način dolazi do istih. Definirati granične vrijednosti koeficijenta frikcije bijele boje te kvalitete tiska koje mogu utjecati na promjene reproduciranih boja te u skladu s rezultatima istraživanja donijeti preporuke kod korištenja raznovrsnih postupaka procesa izrade termoskupljajućih etiketa.

1. Tehniku fleksografskog tiska moguće je unaprijediti na način da se standardizira područje primjene kolorimetrije boja u kombinaciji s različitim gustoćama nanosa bijele klizne boje.
2. Promjene gustoće obojenja bijele klizne boje nastale uslijed definiranja različitih volumena istih dovode do kolorimetrijskih promjena boja.
3. Različita gustoća obojenja bijele boje dovodi do utjecaja na kvalitetu tiska i doživljaj standardnog promatrača. Definiranjem graničnih vrijednosti moguće je iste standardizirati te na taj način unaprijediti standardizaciju fleksografskog tiska.

1.3. Očekivani znanstveni doprinos

1. Doprinos standardizaciji grafičke tehnologije u području kvalitete fleksografskog tiska kod primjene bojila na polimernim materijalima za izradu termoskupljajućih etiketa.
2. Proširenje upotrebe preporučenih vrijednosti koeficijenta frikcije i konačne kvalitete otiskivanja na polimernim materijalima.
3. Definiranje graničnih vrijednosti koje utječu na kvalitetu tiska prilikom upotrebe procesnih boja u korelaciji s kliznom bijelom bojom kod termoskupljajućih etiketa.

2. TEORETSKI DIO

2.1. Razvoj fleksibilne ambalaže

Pojam ambalaže podrazumijeva sve što je u proizvod upakirano. [24] Fleksibilna ambalaža jest najstariji poznati oblik pakiranja. Iz davnina se za pakiranje služila životinjska koža, meka kora drveta te veliki listovi. U 19. Stoljeću u Engleskoj se počinje riba zamatati u stare novine, odnosno hrana u papir. Prvu ambalažnu vrećicu napravila je firma E.S. @ A. Robinson 1884 godine u Engleskoj. Krajem 19. stoljeća proizvodnja papirnih vrećica je uhodana. Godine 1910. Prvi je puta upotrebljavana aluminijska folija za izradu fleksibilne ambalaže. Dvije godine nakon započela je proizvodnja prvog sintetskog materijala za izradu fleksibilne ambalaže, a naziv mu je bio celofan i njegov izumitelj dr. Jacques Edwin Brandanbuger.

U današnje vrijeme fleksibilna ambalaža zauzima 40% ukupne proizvodnje ambalaže. I ona je u pravilu tiskana ambalaža. Tiskovne podloge koje se koriste za njezinu proizvodnju jesu na različite načine prilagođeni papiri, zatim sintetski filmovi te metalne folije. [25]

Za tisak i izradu fleksibilne ambalaže rabe se gore navedena tri materijala i njihove kombinacije. Papir koji je ujedno i tiskovna podloga, služi za izradu većeg broja različitih proizvoda koji se ubrajaju u fleksibilnu ambalažu.

2.1.1 Podjela materijala za izradu fleksibilne ambalaže

Proizvodi iz različiti materijala u koji se pakira roba, odnosno predmeti raznih veličina i oblika naziva se ambalaža. Kako se svojstva ambalažnog materijala prenose na samu ambalažu, sigurno je da će svojstva ambalaže ovisiti o vrsti ambalažnog materijala. Kako bi ambalaža kvalitetno zaštitila proizvod u cijelom lancu od proizvodnje do potrošnje ovisi upravo odabir pravog ambalažnog materijala. Odabir ambalažnog materijala zahtjeva i odabir tehnologije za proizvodnju ambalaže izgled, oblik, veličinu, namjenu i način uporabe ambalaže i njezinu cijenu. [26]

Prema vrsti materijala od kojeg je fleksibilna ambalaža izrađena ona može biti:

1. papir i karton
2. polimerni materijali
3. višeslojne metalne folije i laminati

Za tisak i izradu fleksibilne ambalaže rabe se gore navedena tri materijala i njihove kombinacije. Papir koji je ujedno i tiskovna podloga, služi za izradu većeg broja različitih proizvoda koji se ubrajaju u fleksibilnu ambalažu.

2.1.2 Papir i karton

Papir je od svih materijala najstariji materijal koji služi za tiskovnu podlogu i kao materijal za izradu tiskane fleksibilne ambalaže. Koriste se različite vrste papira a najčešće su prokazane u (tablici 1.). [25]

Tablica 1. Najčešće korištene vrste papira kod fleksibilne ambalaže

Papirni materijali za fleksibilno pakiranje	Papiri za laminaciju
Papiri za vrećice	Papiri premazani kaolinom
Prozirni papiri	Svileni papiri
Masni papiri	Pergamentni papiri
Voštani papiri	Prozirni papiri
Pergamentni papiri	Super kalandrirani papiri
Bijeljeni sulfatni papiri	Papiri za vrećice

Papir se najčešće izrađuje iz drvene celuloze i/ili recikliranog papira i kartona, koji se potom kemijski ili mehanički obrađuje za proizvodnju celulozne pulpe. Pulpa se izbjeljuje i obrađuje u stroju za izradu papira kako bi se proizvela kontinuirana traka. U grafičkoj tehnologiji papir po želji može biti premazan ili drugačije površinski obrađen kako bi se poboljšala njegova površina i estetske karakteristike.

Najčešća gramatura papira koja se koristi za tisak i izradu ambalaže je u rasponu od 60 –120 g/m² (debljina između 0,07 mm i 0,18 mm).

Papirnat materijale gramature od 170 do 600 g/m² odnosno debljine od 0,35 – 0,8 mm nazivaju se kartoni. Prvenstveno se koristi u industriji ambalaže za izradu složivih kartonskih kutija, ali se također koristi kod izrade drugih grafičkih proizvoda. Postoje kartoni od višeslojnih i jednoslojnih materijala.

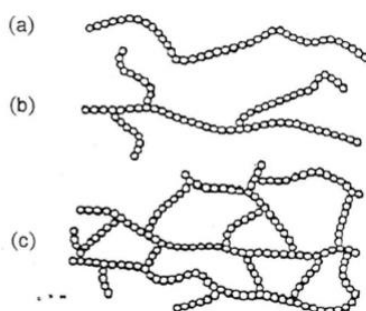
2.1.3. Polimerni materijali

Polimeri su makromolekularni spojevi nastali od monomera koji su dobiveni od različitih sirovina, uglavnom nafte, zemnog plina ili ugljena, njihovim polimeriziranjem. Tijekom kemijske reakcije polimerizacije od malih molekula monomera, nastaju visokomolekulni spojevi polimeri [27]. Polimeri se sastoje od makromolekula koje su građene od velikog broja ponavljanih strukturnih jedinica (mera). Ovisno o stupnju polimerizacije, molekula polimera može biti sastavljena od više od 1000 atoma. Duljina polimernog lanca određena je brojem ponavljanih jedinica (mera) u lancu (tablica 2.). Makromolekule mogu imati linearnu, granatu ili umreženu strukturu (slika 1.).

Tablica 2. Vrste polimera i njihove ponavljane jedinice

Karakteristika	Ponavljane jedinice
Polietilen (PE)	$[-CH_2-CH_2-]$
Polipropilen (PP)	$[-CH_2-CH(CH_3)-]$
Polistiren (PS)	$[-CH_2-CH(C_6H_5)-]$
Poli(vinil-klorid) (PVC)	$[-CHCl-CH_2-]$
Poli(vinilden-khlorid) (PVDC)	$[-CHCl-CHCl-]$
Poli(etilen-tereftalat) (PET)	$[-O-CH_2-CH_2-OOC-C_6H_4-CO-]$
Poliamidi (PA)	$[-OC-(CH_2)_n-NH-]$ ili $[-OC-(CH_2)_n-CO-NH-(CH_2)_m-NH-]$
Polikarbonati (PC)	$[-O-R_1-O-COO-R_2-]$
Poliuretani	$[-O-CO-NH-R_1-NH-COO-R_2-]$

Polimernim materijalima zajedničko je da su teško topivi, imaju nisku gustoću, kemijski su inertni i podložni su razgradnji utjecajem topline pri relativno niskim temperaturama (izuzev duromera). Imaju veoma dobra tehnološka svojstva te se lako oblikuju uz mali utrošak rada, energije i vremena. Kod polimera nije potrebna naknadna površinska obrada niti površinska zaštita, a bojenje se izvodi jednostavnim dodavanjem bojila. Moguće je proizvesti proizvode različitih oblika i svojstava primjenom velikog broja postupaka prerade. Mogu se proizvesti u obliku vrlo tanke folije, nanositi u tankom sloju na drugi materijal, itd.

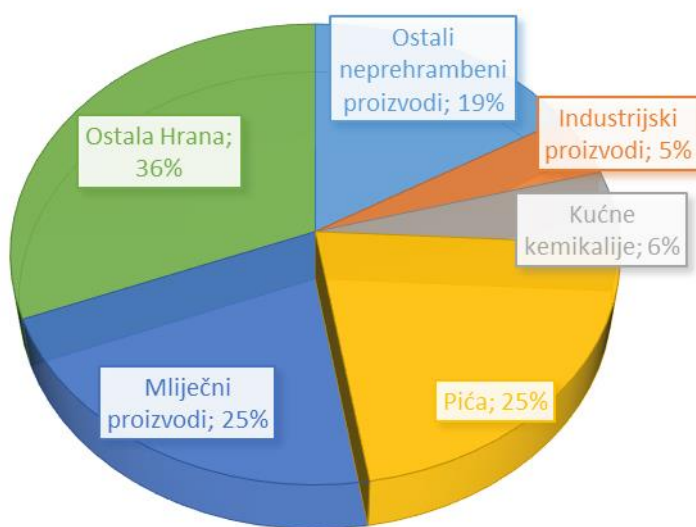


Slika 1. Razgranatost makromolekula a. linearna b. razgranati c. umreženi

Polimeri podliježu degradativnim promjenama – starenju. Uslijed utjecaja različitih elemenata klime, koji za posljedicu ima slabljenje fizičkih i mehaničkih svojstava materijala dolazi do promjene svojstava polimernog materijala [28]. Proces je veoma spor, a ubrzava se djelovanjem svjetlosti i povišene temperature. Može se spriječiti, odnosno usporiti dodavanjem stabilizatora, tvari koje na različite načine usporavaju razgradnju polimera.

Danas polimerni materijali su nezaobilazan dio svakodnevnice u većini industrijskih grana, pa samim time i u svakodnevnom životu. Industrija polimernih materijala jedna je od najbrže rastućih grana industrije u posljednjih 60 godina. Svjetska potražnja polimernih materijala ukupno iznosi oko 220 milijuna tona, a u Europi je to oko 47 milijuna tona. Proizvodnja u Hrvatskoj za sada iznosi neznatnih 40.000 tona godišnje [29]. Približno polovica svih polimera koji se prerađuju u Europi koristi se za proizvodnju ambalaže.

Također, od ukupnog broja ambalažnih proizvoda, veći dio se koristi u prehrambenoj industriji (oko 70%) što predstavlja glavno područje primjene polimernih materijala [29]. Na (slici 2.) prikazana je upotreba polimernih materijala u industriji ambalaže u Europi.



Slika 2. Primjena polimerne ambalaže

Za pakiranje prehrambenih proizvoda najviše se upotrebljavaju polimerni materijali u prehrambenoj industriji. Postoje mnogobrojne prednosti korištenja polimera kao materijala ambalaže za pakiranje hrane. Glavna namjena im je održati hranu što duže svježom te spriječiti njeno kvarenje. Kemijske postojanosti i inertnosti u dodiru s hranom, niska cijena, estetski

izgled i male mase te široki raspon fizikalnih i optičkih svojstava svojstva su zbog koji se polimeri upotrebljavaju za izradu ambalaže. Također se mogu oblikovati u proizvode raznih veličina i oblika te se mogu integrirati u proizvodni proces, gdje se u istoj proizvodnoj liniji odvija formiranje ambalaže, punjenje te zatvaranje ambalaže. Glavni nedostatak polimerne ambalaže je propusnost svjetla, pare i plinova.

Polimerni materijali kod ambalaže

Postoji veliki broj polimernih materijala, ali u industriji ambalaže najviše se upotrebljavaju plastomeri (preko 90 %), i to najčešće polietilen (PE) i polipropilen (PP) (oko 65 %), a slijede ih poli(etilen-tereftalat) (PET), poli(vinil-klorid) (PVC) i polistiren (PS) [30]. Za specifične namjene rabe se poliamidi (PA) i polikarbonati (PC). Plastomeri omekšavaju nakon izlaganja toplini te se na sobnoj temperaturi ponovno vraćaju u prvobitno stanje. Zbog toga što se mogu vrlo lako oblikovati u različite proizvode (boce, posude, folije), plastomeri su veoma pogodni za pakiranje hrane [26]. Osim toga, gotovo svi plastomeri su reciklični (rastaljeni se ponovno koriste kao sirovina za proizvodnju novih proizvoda).

Najčešće se koriste folije za pakiranje (uglavnom PE, PP i PVC), posude (boce, konzerve i dr. najčešće od PVC, PET i PE), polimerne pjene kao zaštitna ambalaža (napravljene od PS, PE, i dr.) i strukturna ambalaža (kutije napravljene od PVC, PC i PMMA). Oko 70 % folija za pakiranje u Europskoj uniji su različiti polietileni [31].

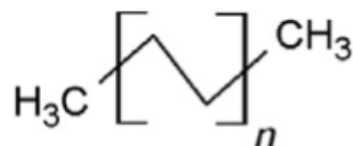
2.1.2.1. Poliolefini: Polietilen i Polipropilen

Polietilen i polipropilen, dva najčešće korištena polimera za pakiranje hrane te za ostale, manje poznate polimere koji također pripadaju skupini poliolefina [22]. Oba materijala, i polietilen i polipropilen, posjeduju odličnu kombinaciju svojstava, kao što su elastičnost, čvrstoća, mala masa, kemijska postojanost, jednostavna proizvodnja te prikladnost za recikliranje i ponovno korištenje.

Polietilen

Najjednostavniji i najjeftiniji polimer dobiven polimerizacijom etilena je polietilen (PE). Polietilen je postojan na veliki broj kemikalija, osim oksidirajućih kiselina, halogenih elemenata i malog broja ketona. Makromolekule polietilena nisu isključivo sastavljene od

ravnih lanaca (linearne strukture). Na sobnoj temperaturi je netopljiv u svim otapalima, dok se iznad 60°C otapa u toluenu, ksilenu, tetralinu i ugljičnom tetrakloridu [22]. Potpuno je postojan na utjecaj i apsorpciju vode. Pod utjecajem UV zračenja podložan je kemijskoj i toplinskoj razgradnji. Dodatkom 1% antioksidansa razgradnja se potpuno sprječava. Može se prerađivati svim osnovnim postupcima prerade plastomera, najčešće ekstrudiranjem, puhanjem i injekcijskim prešanjem.



Slika 3. Kemijska struktura polietilena

Polietileni se mogu podjeliti u više tipova na temelju prosječne specifične gustoće i strukture makromolekula: polietilen visoke gustoće i niske gustoće. Polietilen visoke gustoće (PE-HD) sastavljen je od makromolekula s linearnom strukturom, te je čvrst, žilav, otporan na vlagu i kemikalije, propustan za plinove te se lako proizvodi i oblikuje [26]. Koristi se za proizvodnju boca za prehrambene proizvode vodu i sokove, pakiranja za žitarice, kutijica za margarin, boce za mlijeko, vrećica za prehrambene namirnice, vreća za smeće te samoljepljive etikete (slika 4.). Od PE-HD se također izrađuju folije koje su mliječno bijele boje, čvrste i krute te postojeane do temperature 110°C.



Slika 4. Primjer ambalaže od polietilena, Izvor: *Grafpx d.o.o*

Polietilen niske gustoće (PE-LD) osnovni lanac mu je u velikoj mjeri razgranat. Struktura je djelomično kristalasta (50,60%) krutina, sa talištem od oko 115°C i gustoće od 0,915-0,935 g/cm³. On je čvrst, elastičan, otporan na vlagu te se lako može hermetički zatvoriti. Najveća

količina PE-LD-a zbog svoje prozirnosti koristi se za proizvodnju folija različite namjene, najčešće vreća i vrećica (slika 5.). Folije su transparentne, mekane, elastične, zadržavaju elastičnost do -50°C (pogodno za namirnice koje se zamrzavaju). Ne sadrže omekšavala i fiziološki su inertne. Površina folija od PE-LD treba se obrađivati posebnim postupcima kao što su oksidacija ili kloriranje kako bi se poboljšalo primanje otiska u tiskarskom procesu. Od ovog materijala se također izrađuju vrećice za kruh i smrznutu hranu, savitljivi poklopci te tube i druge fleksibilne ambalaže za pakiranje vrlo viskoznih i pastoznih proizvoda.



Slika 5. Vreće od PE-LD folije

Polipropilen

Polipropilen (PP) je plastomer linearnih molekula te se dobiva polimerizacijom propilena uz prisutnost odgovarajućeg katalizatora. Ima veoma nisku gustoću te visoko talište od 165°C . Svojstva su mu slična svojstvima polietilena, no za razliku od njega, polipropilen je nešto čvršći te nema voštani opip. Netoksičan je, netopljiv, nepropustan za vodenu paru, kemijski postojan prema sastojcima namirnica, uključujući i masnoće, čak i pri povišenoj temperaturi [32]. Svojstva mu se manje mijenjaju s porastom temperature nego kod polietilena (čvrstoća PP pri 100°C jednaka je čvrstoći PE pri 40°C). Pri nižim temperaturama pokazuje određenu osjetljivost, već pri 0°C postaje izrazito krhak [22]. Kako bi mu se smanjila krhkost proizvodi se u kombinaciji sa etilenom. Zbog svoje visoke točke tališta ($+160^{\circ}\text{C}$) može se sterilizirati i prikladan je za ambalažu za pakiranje toplih i vrućih jela (juhe, variva, umaci) te za ambalažu koja se može koristiti u mikrovalnoj pećnici. PP se koristi također u ambalaži za izradu etiketa (slika 6.).



Slika 6. Etikete od polipropilena (PP) *Izvor: Grafpex d.o.o*

PP folije su bezbojne, prozirne kao staklo, glatke i sjajne površine te vrlo dobro primaju tisak. Otporne su na povišenu temperaturu pa se stoga mogu upotrijebiti za pakiranje robe u vrućem stanju. Istezanjem zagrijanih folija poboljšavaju se mehanička svojstva, a osobito postojanost pri niskoj temperaturi. Takve folije se mogu upotrijebiti za pakiranje namirnica koje se zamrzavaju, i to do -50°C . PP folije se dosta upotrebljavaju za proizvodnju laminata i transportnih vreća.

2.1.2.2. Poliesteri

Poliesteri se dijele na termoplaste i reaktivne plastične materijale. Oni su kopolimeri nastali kondenzacijskom polimerizacijom dikarboksilne kiseline (tereftalatne kiseline) i diola, odnosno dialkohola (etilen glikol). U skupinu poliestera spadaju poli(etilen-tereftalat) (PET), polikarbonat (PC) i poli(etilen-naftalat) (PEN). Najčešće korišteni poliester u prehrambenoj industriji je PET [33].

Poli(etilen-tereftalat)

Poli(etilen-tereftalat) (PET) nastaje polikondenzacijom estera tereftalatne kiseline. PET je plastomerni linearni poliester, visoke molekulske mase, relativno visokog tališta i stupnja kristalnosti, odličnih mehaničkih svojstava te kemijske i toplinske postojanosti [31]. Razvijen je četrdesetih godina prošlog stoljeća za proizvodnju sintetičnih vlakana. U ranim sedamdesetima dolazi do komercijalne proizvodnje PET polimernih boca, koja je i danas najčešći oblik upotrebe PET-a. U početku je PET smatran nepogodnim za preradbene postupke kao što su ekstrudiranje i injekcijsko prešanje zbog krhkosti debelih dijelova kristaliziranih iz

taline. Međutim, 1966. godine su se počele primjenjivati vrste PET-a koje su pogodne i za tu vrstu preradbe [34].

PET posjeduje dobra barijerna svojstva, odnosno nepropustan je za plinove (kisik i ugljični dioksid), vodu i vlagu. Također ima dobru otpornost na toplinu, mineralna ulja, otapala i kiseline, ali ne i na lužine. Glavni razlozi popularnosti ovog materijala u prehrambenoj industriji su izvrsna prozirnost i sjaj, dobra barijerna svojstva koja sprječavaju hlapljenje gaziranih pića, mala masa, žilavost te otpornost na lomljenje i mehanička oštećenja [26]. Osnovni nedostatak PET-a je otežana prerada zbog relativno spore kristalizacije iz taline, što zahtjeva održavanje temperature prerade u uskim granicama [28].

Tablica 3. Važnija fizička svojstva poli(etilen-tereftalata) (PET)

Svojstva	Jedinica	PET
Gustoća	g/cm ³	1,33
Rastezna čvrstoća	N/mm ²	72,5
Savojna žilavost	J/m	180
Modul elastičnosti	N/mm ²	3400
Tvrdoća		B 145
Koeficijent toplinskog širenja	1/K	7 · 10 ⁻⁵
Temperatura upotrebe	° C	70/100
Temperatura staklišta	° C	67-81
Temperatura topljenja	° C	256-264

PET može biti amorfan (proziran) i polukristaličan (neprozirne bijele boje). Kristalnost se može mijenjati od 0 do 60 %, a lanci mogu biti ili slučajno raspoređeni ili visoko orijentirani duž jedne ili dvije osi. Amorfni PET ima bolju duktilnost, ali manju krutost i tvrdoću od polukristaličnog PET-a koji je čvršći, krući i tvrdi. S povišenjem stupnja kristaličnosti raste i postojanost na kemikalije i otapala [34]. Područja primjene PET ambalaže su spremnici (boce, kanistri i kace), pakiranja hladnih jela (torte, kolači, meso) te vrećice za grickalice. Zahvaljujući maloj masi i prozirnosti te otpornosti na povišenu temperaturu PET se koristi i za proizvodnju ambalaže za ostale proizvode (deterdženti i kozmetika), za folije za kućanstvo i industriju [35]. Na (slici 7.) prikazana je PET folija debljine 12 μm. Sjajna je i kristalno prozirne strukture, te je se upotrebljava kod tiska ali ne kao samostalni materijal.

PET boce su najpoznatiji proizvod ovog materijala. Primjena PET-a za proizvodnju boca za gazirana pića konstantno raste. PET boca s gaziranim pićem može izdržati relativno visoki unutrašnji pritisak koji neće deformirati bocu ili prouzrokovati eksploziju.

Jedna od glavnih mana PET ambalaže je u tome što zauzima veliki volumni udio u domaćinstvu, a odbačena na deponijima zauzima ogroman koristan prostor. PET ambalaža se može u potpunosti reciklirati te se reciklirana koristi kao vlakna (poliesterska), izolacija te ambalaža za druge neprehrambene proizvode [26].



Slika 7. Poliesterska folija

Polikarbonati

Polikarbonati (PC) su poliesteri ugljične kiseline [H_2CO_3] i polivalentnih alkohola ili fenola te s obzirom na građu makromolekula mogu biti linearni, razgranati i umreženi. Polikarbonati su bezbojni, prozirni (90% prozirnosti stakla), amorfni materijali visokog sjaja površine, otporni na mehanička oštećenja, relativno visoke temperaturne postojanosti i do 120°C , vrlo žilavi i dimenzijski stabilni [33]. Uglavnom se koriste kao zamjena za staklo. Zbog visoke cijene primjena u proizvodnji ambalaže ograničena samo za rješavanje specifičnih problema pakiranja. Ovaj materijal se lako grafički oblikuje, a budući da se primjenjuju tamo gdje se zahtjeva velika otpornost na toplinu, potrebno je koristiti i posebne tiskarske boje. PC filmovi se izrađuju u debljinama od 20 do $250\text{ }\mu\text{m}$ za pakiranje hrane pri visokim temperaturama [26].

Poli(etilen-naftalat)

Poli(etilen-naftalat) (PEN) je polimer koji nastaje reakcijom kondenzacije dimetil naftalen dikarboksilata i etilen glikola. To je relativno novi član grupe poliestera sa odličnim svojstvima zbog visoke temperature staklastog prijelaza. Barijerna svojstva PEN ambalaže za ugljični dioksid, kisik i vodenu paru su čak bolja i od PET ambalaže i PEN pokazuje bolje rezultate na visokim temperaturama, čime je omogućeno višestruko toplo punjenje, pranje i ponovno korištenje. Ipak, PEN je 3 do 4 puta skuplji od PET ambalaže. Zbog toga što PEN pruža zaštitu od prijenosa arome i mirisa, pogodan je za proizvodnju boca za piće, kao što je pivo.

2.1.2.3. Polistiren

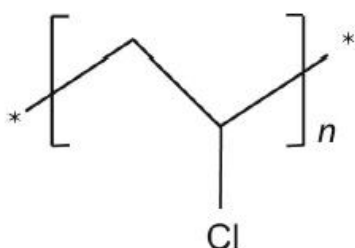
Polistiren (PS) je plastomer linearnih makromolekula dobiven iz monomera stirena i jedan je od najprimjenjivanih polimernih materijala. Polimerizacijom stirena u masi dobiva se polimer velike specifične gustoće. Polistiren je termoplastični materijal jakih svojstava kao što je prozirnost, dobro primanje boje, te laka proizvodnja. Temperatura mekšanja polistirena je oko 100°C, a uporabe do 75°C [26]. Uz veliku primjenu u građevinarstvu, polistiren se najčešće koristi u prehrambenoj industriji i to kao zaštitna ambalaža za pakiranje hrane (posude, čaše, tanjuri, poklopci, pribor za jelo, i dr.). Monomer stirena (vinil benzen) dobiva se iz etilena i benzena. Zbog svoje velike dimenzijske stabilnosti i prozirnosti, biaksijalno orijentirani polistiren (biaxially oriented) koristi se za omatanje svježeg povrća, te se koristi i kao stezljiva (shrink) i mjehurasta (blister) ambalaža. Nedostaci ovog materijala su krhkost, niska temperatura mekšanja, loša barijerna svojstva (velika propusnost za plinove i vodenu paru), neotpornost prema aromatskim ugljikovodicima, benzinu, eteru, aldehidima i ketonima, eterima i kloriranim ugljikovodicima [28].

PS-HI (High Impact Polystyrene) je polistiren visoke udarne žilavosti, kopolimer stirena sa polibutadienom. Komercijalne vrste polistirena sadrže od 3% do 12% polibutadiena. Modificirani polistiren je žilav i ima jaču otpornost pri kidanju za oko 15%, za razliku od običnog PS koji je tvrd i lomljiv materijal.

PS-E (Expanded polystyrene) poznatiji pod trgovačkim nazivom „stiropor“ je pjenasti "ekspandirani" polimerni materijal. Porozan je plastomerni materijal, ćelijaste strukture i niske gustoće. Proizvodi se impregniranjem PS-a kemijski neutralnim plinom ili lako hlapljivim tekućinama, koji zagrijavanjem ekspandiraju materijal do željene gustoće i oblika [26]. Ekspandirani polistiren je materijal sa zatvorenim porama krut i najčvršći od svih pjenastih materijala, te daje laganu ambalažu stabilnog oblika sa relativno dobrim mehaničkim svojstvima. Prije svega EPS je lagan i izdržljiv te ima dobra izolacijska svojstva (zvuka i topline). Dobro amortizira dinamička naprezanja robe te se mogu izrađivati ambalaže različitih oblika i dimenzija, prije svega posude i kutije. Koristi se također za zaštitnu i dekorativnu ambalažu.

2.1.2.4. Poli(vinil-klorid)(PVC)

Polivinil klorid (PVC) nastaje polimerizacijom vinil-klorida u suspenziji ili otopini i nastaje linearni polimer, koji ima kratke grane i duge bočne grane. PVC je materijal koji se teško prerađuje, on je tvrd, krut i proziran materijal, bijele do žućkaste boje bez mirisa i okusa. Postojan je na utjecaj atmosferilija, vlage, kiselina i lužina, masti i ulja, ima dobra reološka svojstva te dobra električna svojstva [32].



Slika 8. Kemijska struktura polivinil klorida

PVC je uglavnom amorfan materijal sa udjelom 5 do 10 % kristalnog oblika. Ovisno o polimerizaciji vinil-klorida uvjetovana je struktura nastalih makromolekula i stupanj kristalnosti. Prema tome ovise: specifična masa (gustoća), temperatura prijelaza u stakasto stanje, te reološka, mehanička i toplinska svojstva. Temperaturno područje polimerizacije je 45°C do 75°C.

PVC je materijal koji je idealan za pakiranje namirnica jer je inertan te ne propušta paru i plinove. Isto tako taj ambalažni materijal slabije propušta UV zračenje od stakla. PVC ima vrlo široku primjenu u području pakiranja, radi lakoće oblikovanja materijala, kao što su kutijice za mesne proizvode i doze za farmaceutske proizvode [22]. Od ovog materijala se također proizvode filmovi, prevlače se boce i limene posude, plastificiraju se papiri i kartoni. Proizvodi se termooblikovana ambalaža (slika 9.).



Slika 9. Termoskupljajuće etikete (Shrink sleeve) od PVC materijala

2.1.2.5. Poliamidi

Poliamidi (PA) su kristalasti plastomeri visoke temperature topljenja i dobre otpornosti na razne vrste otapala. Komercijalni tip poliamida označavaju se brojevima koji imaju veze sa brojem atoma ugljika u ponavljanoj jedinici. Primjer, poliamid 6, ima šest atoma ugljika u monomeru i on se najčešće koristi za pakiranja. Prosječna molekulska masa poliamida je granici između 15 000 do 25 000. Veliki dio poliamida je u čvrstom stanju u djelomično kristalnom stanju, stupnja kristalnosti od 30% do 50%. Materijali imaju dobra fizička svojstva: nizak koeficijent trenja, savojnu žilavost, rasteznu čvrstoću, niska je propusnost na plinove i arome. Također su otporni na trošenje i zamor materijala i do 120 °C. Mehanička i toplinska svojstva poliamida, slična su PET materijalu, pa imaju i sličnu upotrebu. U prehrambenoj industriji PA se najčešće koristi kao materijal vrećica za kuhanje hrane. To je vrsta pakiranja prehrambenih proizvoda u kojima se hrana može kuhati i peći. Takve vrećice mogu biti čvrste i nepropusne i koriste se za čuvanje smrznute hrane, ali mogu biti i porozne kako bi se omogućilo da kipuća voda uđe unutar pakiranja.

2.1.2.6. Etilen-vinil alkohol (EVOH)

Etilen-vinil alkohol (EVOH) je kopolimer etilena i vinil alkohola. Posjeduje odlična barijerna svojstva za plinove i ugljikovodike. Iz tog razloga najviše se primjenjuje u prehrambenoj industriji kao ambalažni materijal s ciljem sprječavanja prodora kisika i vlage u pakiranje,

odnosno produljenja roka trajanja proizvoda. Također sprječava prolazak aromatskih spojeva, odnosno gubitak mirisa proizvod te apsorpciju neugodnih mirisa iz okoliša. Takva ambalaža zadržava kisik izvan, a okuse i mirise unutar pakiranja. EVOH je proziran, otporan na vremenske uvjete, ulja i otapala, elastičan je i recikličan. Glavni nedostatak ovog materijala je komplicirana izrada zbog čega je puno skuplji nego ostali ambalažni materijali za pakiranje hrane [26]. Zbog odličnih barijernih svojstava, proizvođači ambalaže, koriste EVOH kao materijal vrećica za vakumiranje hrane, kako bi produžili rok trajanja proizvoda i zaštitili njihove hranjive tvari od bakterija.

2.1.3. Višeslojne metalne folije ili laminati

Ambalažni materijali slojevite strukture nastaju spajanjem dva ili više slojeva materijala zajedno. Oni na presjeku imaju točno definirane slojeve materijala od kojega su složeni. Ti materijali uključuju različite kombinacije materijala iz širokog spektra fleksibilnih uzoraka kao što su tanke aluminijske folije, polimerni filmovi i papir. Ambalažni materijali, osim velikog broja dobrih svojstava važnih za realizaciju i pravu funkciju određene ambalaže, imaju i negativnih svojstava. Tako se uvijek bira najpogodniji ambalažni materijal čija će negativna svojstva imati najmanji negativni utjecaj na dobru realizaciju samog gotovog proizvoda. Stoga je potrebno ispuniti neke uvijete:

- Osigurati zatvaranje ambalaže zataljivanjem
- Poboljšati barijerna svojstva na plinove
- Poboljšati barijerna svojstva na vodenu paru
- Poboljšati barijerna svojstva na elektromagnetska zračenja (UV i svjetlost)
- Poboljšati barijerna svojstva na aromatične tvari
- Smanjiti masu po jedinici površine i debljinu, a time i masu ambalaže po jedinici upakiranog proizvoda

Jedan od zbirnih načina kako poboljšati svojstva sadržanih u jedan ukupni materijal jest laminiranje. Time se postiže optimalna ravnoteža svojstava u skladu sa primjenom, te se omogućuje vrhunski izgled ambalaže koja će stvoriti zahtjevne barijere za razne grane industrije.

Aluminijska folija

Aluminijska folija upotrebljava se za zamatanje prehrambenih proizvoda, ali i kao materijal za izradu laminata. Aluminij (Al) je žilav i mekan materijal koji omekšava zagrijavanjem ali pri niskim temperaturama ne postane krhak tako ga to čini prihvatljivim za pakiranje prehrambenih proizvoda koji se toplinski steriliziraju ili zamrzavaju. aluminijska folija je također ekološki prihvatljiva, jer se može reciklirati i ponovno koristiti. Aluminijske folije mogu se podijeliti prema debljini u rasponu između 0,006 mm i 0,200 mm. Kada debljina prelazi 0,200 mm tada se govori o aluminijskim limovima i trakama. Krutost je nedostatak aluminija, te ako se laminira prevelikim silama može puknuti folija i narušavaju se barijerna svojstva.



Slika 10. Aluminijska folija

Na (slici 10.) prikazana je rola aluminijske folije koja se upotrebljava u kombinaciji sa drugim materijalima (papir ili polimerna folija).

Kao zamjenski materijal za aluminijsku foliju upotrebljavaju se u novije vrijeme monoaksijalno (OPP) i biaksijalno orijentirani polipropileni (BOPP) s metalizacijom, te metalizirani PE. Metalizacijom polimernih materijala uvelike su poboljšana barijerna svojstva vlaga i plin, te smanjen utjecaj elektromagnetnog zračenja (više od 90%).



Slika 11. Metalizirani polimerni materijal

Na (slici 11.) prikazana je polimerna folija oslojena aluminijem. Jača barijerna svojstva ovise o debljini sloja nanesenog metala i raspodjele istog po površini polimerne folije.

2.2. Trenje

Prema definiciji trenje je sila koja se javlja na dodirnoj površini (kontaktu) dva tijela pri njihovom međusobnom gibanju. Trenje otežava gibanje (kinematička sila trenja) ili ga sprječava (statička sila trenja) [36]. Djeluje paralelno s dodirnim površinama, a smjer joj je suprotan smjeru relativnog kretanja. Trenje djeluje tangencionalno na granicu između dva tijela, kada se pod djelovanjem vanjske sile, jedno tijelo kreće ili ima tendenciju relativnog kretanja u odnosu na površinu drugog tijela. Trenje predstavlja otpor što ga gibanju tijela pruža površina po kojoj se tijelo giba ili sredstvo kroz koje se giba i (premda neophodno za hodaње i gotovo sve oblike transporta na zemlji), kao pojava uzrokuje goleme gubitke energije.

2.2.1. Koeficijent frikcije ili koeficijent trenja kao fizikalni oblik

Koeficijent frikcije ili koeficijent trenja jest omjer između sile trenja i težine tijela odnosno pritiska na podlogu, koje klizi ili se kotrlja na nekoj podlozi [37]. Pri dodiru površine dvaju tijela javlja se trenje koje se protivi međusobnom gibanju tih dvaju tijela. Sila trenja koja se mora savladati za uzajamno pomicanje tijela razmjerna je normalnoj sili kojom jedno tijelo djeluje na drugo, a neovisna je o površini (makrogeometrijskoj) dodira.

Trenje ovisi o hrapavosti i kemijskom sastavu površina koje se dodiruju, njihovoj vlažnosti ili podmazanosti te o načinu gibanja tijela (najveći je faktor trenja mirovanja, manji je faktor trenja klizanja, najmanji faktor trenja kotrljanja). Mjerna jedinica faktora trenja kreće se između 0 i 1. Faktor trenja može se odrediti s pomoću kosine s promjenljivim nagibom, tako da se odredi kut α kod kojega se tijelo počinje gibati niz kosinu, $\mu = \tan \alpha$. [18]

Vučna sila (F_v) je definirana kao sila kojom se vuče tijelo dok je sila trenja (F_{tr}) ona koja sprečava ili usporava uzajamno gibanje tijela i uvijek suprotna od smjera vučne sile.

$$F_{tr} = \mu \cdot F_N$$

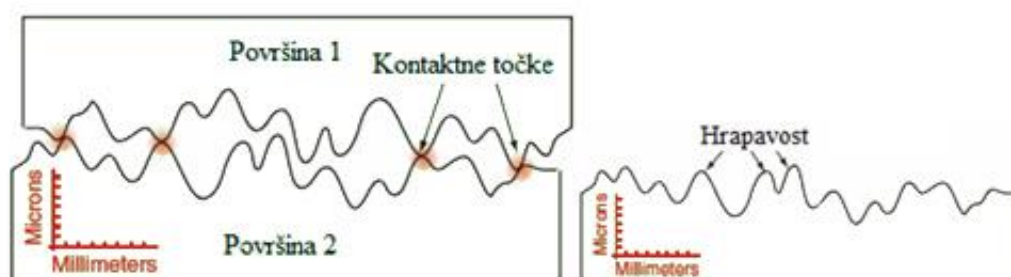
gdje je: F_N – intenzitet normalne sile, N,

μ – faktor trenja.

2.2.2. Mehanizmi trenja

Kada se glatke površine dovedu u kontakt, mikro neravnine na površini uzrokuju da do kontakta dolazi na mjestima gdje dolazi do međupovršinske adhezije. Površinski se razlikuje dodir realna/hrapava ravna površina (konformna) od dodira površinski zakrivljenih ploha (nekonformna).

Mikroanalize otkrivaju kako strojno obrađene površine nisu u potpunosti ravne, tako se pri dodirima tih površina uspostavljaju lokalni kontakti. Radi hrapavosti površine odnosno neravnina na površini stvarna dodirna površina kod ravnih površina je manja od normalne dodirne površine. Stvarna dodirna površina proporcionalna je broju jediničnih dodira te opterećenju odnosno normalnoj sili.



Slika 12. Lokalni kontakti strojno obrađenih površina

Na temelju mikroanalize dolazi se do zaključka da su stvarne površine dodira manje od nazivnih površina dodira te se nazivne površine dodira, zbog jednostavnosti, u mikro pristupu mogu zanemariti.

Tijekom uspostavljanja dodira ($a \Rightarrow b$), pri opterećivanju, dolazi do elastičnog i plastičnog deformiranja područja lokalnih kontakata (slika 12.).

Opterećenje se prenosi preko stvarne površine dodira :

$$F_n = A_s \cdot R_e$$

gdje je: R_e - granica tečenja, N/mm^2 ,

A_s - stvarna površina dodira, mm^2 .

2.2.3. Procesi trenja

Trenje možemo razlikovati prema agregatnim stanjima tijela koje su u kontaktu. Trenje između fluida tj. između čvrstog tijela i fluida je viskoznost ili tekućinsko trenje, a trenje između čvrstih površina je vanjsko trenje. Kako bi došlo do relativnog gibanja između dodirnih površina tijela u paru treba savladati silu trenja. Prema prirodi gibanja razlikujemo trenja s obzirom na vrstu gibanja (klizanje i kotrljanje) i stanje gibanja (statičko i dinamičko).

Statički koeficijent trenja (static friction) μ_s . Sila linearno raste do maksimuma što predstavlja statičku silu trenja F_s , odnosno statički faktor trenja nepomičnog uzorka predstavlja silu potrebnu da potakne gibanje, podijeljenu sa silom koja tlači zajedno dane dodirne površine F_p . Mjerenja izvedena pri visokom povlačenju omogućuju izračun dinamičkog koeficijenta trenja, ali ne i statički koeficijent trenja [38]. Statički koeficijent trenja μ_s prikazan je jednadžbom:

$$\mu_s = F_s / F_p$$

gdje je F_s statička sila trenja, izražena u Newtonima; F_p je normalna sila koju ima masa klizača izražena u Newtonima (-1,90 N).

Dinamički koeficijent trenja (dynamic friction) μ_D . Sila trenja koja djeluje tijekom pokretnih uzoraka u gibanju i često se razlikuje od konstantne vrijednosti koja bi postojala u idealnoj situaciji zbog sekundarnih učinaka povezanih s povećanjem dužine puta.

Dinamička sila trenja μ_D , koja predstavlja silu F_D koja treba održati gibanje danih površina kod definirane brzine podijeljenu sa silom koja tlači dodirne površine F_p [38]. Dinamički koeficijent trenja μ_D izračunava se iz dinamičke sile trenja koristeći jednadžbu:

$$\mu_D = F_D / F_p$$

gdje je F_D dinamička sila trenja, izražena u Newtonima; F_p je normalna sila koju ima masa klizača, izražena u Newtonima (- 1,96 N).

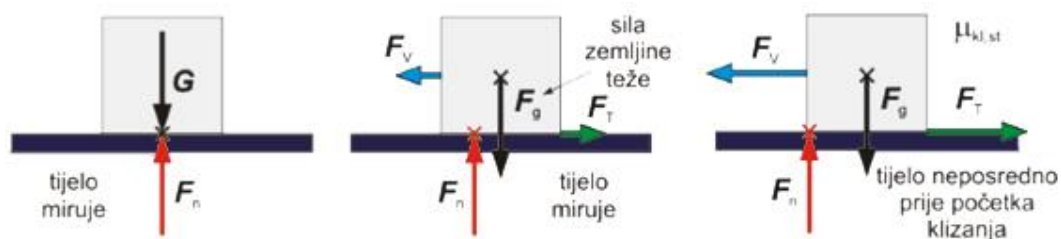
Statičko trenje (neposredno prije pokretanja) je veće od dinamičkog trenja (u pokretu), a trenje klizanja je veće od trenja kotrljanja.

Eksperimentalnim određivanjem faktora trenja za trenutne uvijete gibanja se rješavaju problemi trenja makropristupom.

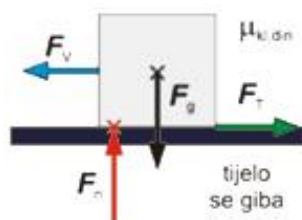
Početnim rastom vučne sile u tijelu se povećavaju naprezanja do trenutka savladavanja sile statičkog trenja. Imamo $\mu_{kl,st}$, $\mu_{kl,din}$

gdje je: $\mu_{kl,st}$ - faktor statičkog trenja klizanja

$\mu_{kl,din}$ - faktor dinamičkog trenja klizanja



Slika 13a. Djelovanja sila na tijelo za vrijeme statičkog mirovanja



Slika 13b. Djelovanja sila na tijelo za vrijeme gibanja

Ubrzanje gibanja tijela (porast brzine u jedinici vremena) određuje rezultanta:

$$F = F_v - F_{tr} = m \cdot a$$

Kada se proučava događaj trenja treba uzeti u obzir tri važne komponente uzroka i posljedica trenja. To su adhezija (međupovršinske veze odnosno prekid i čvrstoću veza između tarnih materijala). Deformacija kao drugi ključni element (tu dolazi do prijenosa energije tarnog para i smicanja površina). I treći je kontaktna površina (hrapavost površine odnosno područje dodira tih površina).

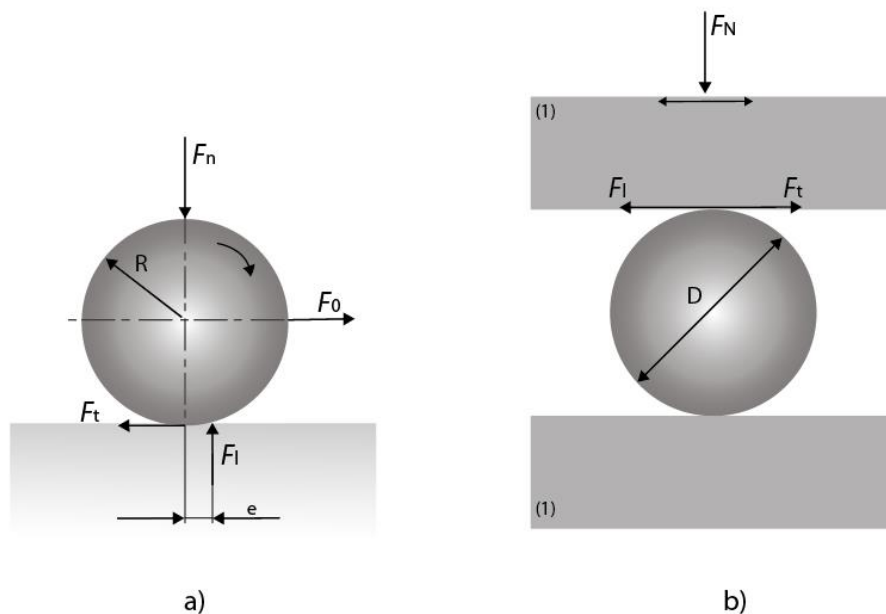
Trenje kotrljanja F_t je trenje koje se javlja pri pokretima kotača, vijaka i kotrljanja kružnih ploča. Utjecaj efekta plastične deformacije opada s porastom broja prolaza, pa možemo reći da je trenje kotrljanja puno manje od trenja klizanja. Kako se povećava broj okretaja tako se smanjuje sila trenja radi smanjenja plastičnih deformacija, tako se sila trenja sastoji samo od otpora elastičnim deformacijama. U tom slučaju približno vrijedi:

$$F_{tr} = \sum F_1 + \sum F_2$$

gdje je

ΣF_1 - otpor na elastičnu deformaciju

ΣF_2 - otpor na plastičnu deformaciju



Slika 14. Trenje kotrljanja a) otpor pri kotrljanju b) pokus trenja kotrljanja

Sila trenja za prvi prolaz određuje se formulom :

$$F_t = k \times \frac{F_N^{2/3}}{D}$$

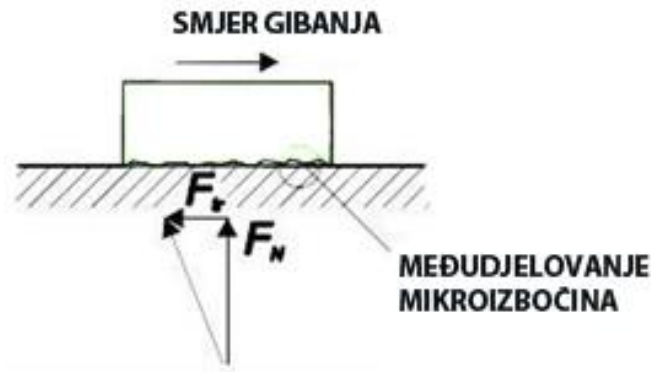
gdje su:

k - konstanta materijala

D - promjer kuglice, mm ($D=2R$)

Općenito je prihvaćeno da je sila trenja direktno proporcionalna normalnoj sili (F_N), a obrnuto proporcionalna promjeru tijela koje se kotrlja.

Trenje klizanja se javlja pri klizanju jednog tijela po površini drugog tijela. Trenje klizanja nastaje između dva spregnuta tijela tribosustava.



Slika 15. Trenje klizanja

Problemom klizanja bavio se još Leonardo da Vinci, a prve zakonitosti postavio je još Amonton oko 1699. godine i kasnije Coulomb oko 1785. godine. Spoznaje do kojih je došlo ispitivanjem njihovih eksperimentalnih istraživanja promatranjem mikroskopskih pojava pri trenju i klizanju dovelo je dosadašnjih postavljenih pravila:

- Sila trenja (F_t) djeluje suprotno od smjera relativnog gibanja i kod suhog dodira proporcionalna je normalnom opterećenju (F_N);

$$F_t = f \cdot F_N$$

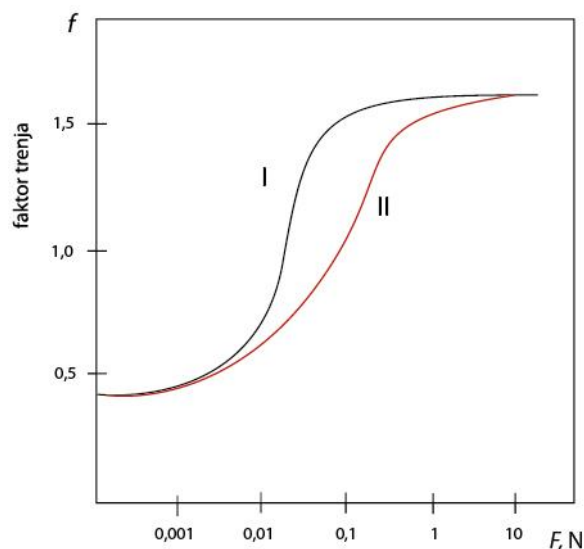
Gdje su: F_t - tangencijalna sila, N

F_N – normalna sila, N

f - faktor trenja

- Faktor trenja definira se kao omjer sile trenja i normalnog opterećenja;
- Iz izraza $f = F_t / F_N$ vidi se da sila trenja ne ovisi o nominalnoj dodirnoj ploštini, niti o brzini klizanja.

Pravila vrijede za široki opseg radnih uvjeta te za većinu metala koji imaju definiranu granicu razvlačenja R_t , ipak nisu potpuno primjenjiva na sve uzorke spregnutih materijala. U uvjetima suhog trenje površine i podmazivanja na kojima se nalaze slojevi oksida, faktor trenja ne raste proporcionalno opterećenju (slika 15.) [39] .



Slika 16. Ovisnost faktora trenja o normalnom opterećenju

Brzi porast trenja posljedica je probijanja oksidnog sloja uslijed porasta opterećenja. Tada se čisti metalni dodir prirodno oksidiranih površina (krivulja I), radi manje kompaktnosti oksidnog sloja i njegove slabije povezanosti s osnovnim metalom, ostvari pri nižim opterećenjima nego kod namjerno oksidiranih površina (krivulja II) kod koje je oksidni sloj jače povezan sa materijalom.

Sila trenja kod klizanja predstavlja zbroj četiri komponente, koje su i same zbroj pojedinačnih komponenata i koje djeluju na svakom dodiru mikro izbočina materijala u kontaktu:

$$F_t = \Sigma F_1 + \Sigma F_2 + \Sigma F_3 + \Sigma F_4$$

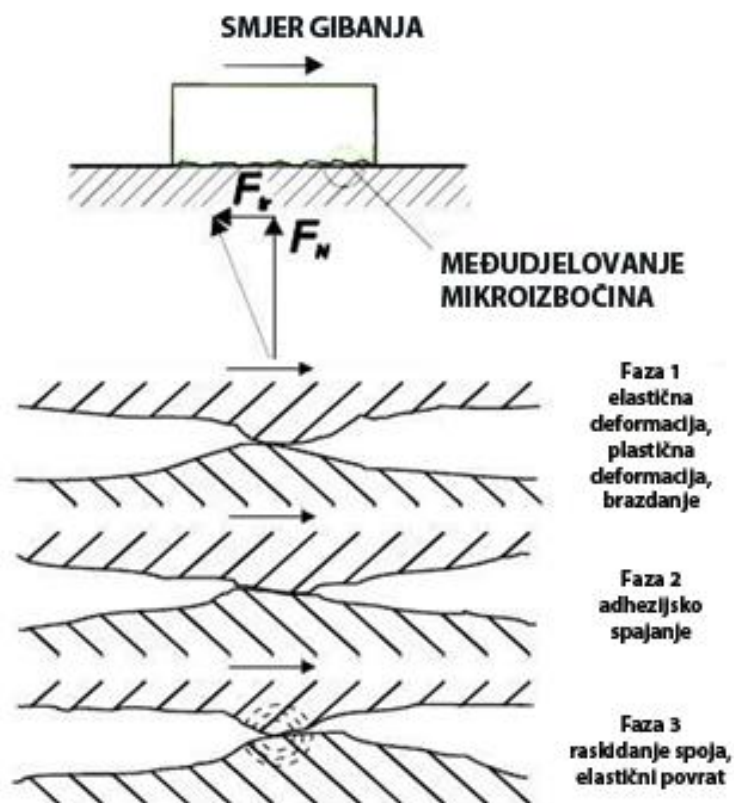
ΣF_1 - otpor na elastičnu deformaciju (proporcionalan modulima elastičnosti kliznog para);

ΣF_2 - otpor na plastičnu deformaciju (ovisi o granicama tečenja kliznog para);

ΣF_3 - otpor na brazdanje (ovisi o duktilnosti kliznog para i brzini relativnog gibanja);

ΣF_4 - otpor na kidanje adhezijskih veza (ovisi o jačini adhezijskih veza uspostavljenih između materijala kliznog para) [39].

Jedinični događaj procesa klizanja od trenutka dolaska mikroizbočina u kontakt, pa do raskida sloja prikazan je na (slici 17.).



Slika 17. Faze procesa klizanja

Pod opterećenjem u prvoj fazi javljaju se specifični pritisci uslijed čega u pravilu dolazi do plastične deformacije materijala. Otpor na elastičnu deformaciju proporcionalan je modulima elastičnosti materijala kliznog para, otpor na plastičnu deformaciju ovisi o njihovim granicama tečenja, otpor na brazdanje ovisi o njihovim duktilnostima i o brzini relativnog gibanja, a otpor na kidanje adhezijskih veza ovisi o jačini adhezijske veze (Van der Waals, elektrostatička, metalna i kovalentna) uspostavljene između materijala kliznog para.

2.2.4. Mehanizam određivanja hrapavosti podloga u grafičkoj tehnologiji

Hrapavost podloge za tisak je jedan od najvažnijih čimbenika u samom procesu otiskivanja i kasnije u procesu dobivanja konačnog proizvoda koji ide u konačnu uporabu. Ispitivanje hrapavosti površine u grafičkoj tehnologiji koristi se laboratorijske metode koje se baziraju na količini propuštenog zraka između ispitivanog materijala i neke glatke metalne ili staklene površine. Što je veća količina propuštenog zraka između standardiziranih mjernih površina, veća je definirana hrapavost promatranog uzorka. Kod tiskovnih podloga vrijednost hrapavosti se izražavaju u mikrometrima ili mililitrima u sekundi.

Također se hrapavost može mjeriti profilometrijskim metodama koje mjere stvarnu topografiju površine i baziraju se na pokretnoj igli koja definira hrapavost površine preko koje prolazi i u neposrednom su kontaktu.

Glatkost tiskovne podloge kao mjera u kojoj je površina tiskovne podloge oslobođena nepravilnosti i nejednakosti komplementarna je hrapavosti – mjeri u kojoj su nepravilnosti i nejednakosti prisutne na površini promatrane podloge. [40] Prosječna hrapavost R_a je područje između profila hrapavosti i njegove srednje linije ili integral apsolutne vrijednosti visine profila hrapavosti po duljini vrednovanja:

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L z(x) dx$$

gdje je L duljina profila, a $z(x)$ je vrijednost apsolutne visine referentnog profila u točki x . Nekoliko je kategorija u koje je moguće svrstati hrapavost podloge: [41]

- optička hrapavost na skali $< 1 \mu\text{m}$,
- mikrohrapavost $1 \mu\text{m} - 100 \mu\text{m}$,
- makrohrapavost $0,1 \text{ mm} - 1 \text{ mm}$.

2.3. Fleksotisak

Fleksotisak ili fleksografski tisak (skraćeno flekso) temelji se na jednom od najstarijih principa otiskivanja – visokom tisku. Fleksotisak je tehnika tiska koja se početkom 20. stoljeća naziva anilinski tisak i dobila je naziv zbog glavnog sastojka tiskarskog bojila - anilin ulja. Uporaba anilinskih boja je u prehrambenoj ambalaži zabranjena jer su otrovne, pa su se kao nadomjestak anilinskim bojama razvile i proizvele nove tiskarske boje, ali naziv je ostao zadržan do 1951 godine, kada je Franklin Moss vođa tiskara ambalaže započeo kampanju promjenu naziva i tako je nakon 1952 godine do danas zadržan naziv fleksotisak [42].

Ova tehnika tiska koristi savitljive ploče sa uzdignutim tiskovnim elementima s direktnim principom tiska na podlogu. Savitljive ploče su uglavnom izrađene od gume ili fotoosjetljivih polimera. Fleksotiskarska ploča se vrlo često naziva i kliše (franc. clisher = otisnuti), pogotovo u fleksografskoj struci. Fleksotisak je vrlo osjetljiva tehnika tiska, a tiskovna forma lako se

prilagođava svim tiskovnim podlogama. Tiskovni elementi na tiskovnoj formi povišeni su u odnosu na slobodne površine, a tiskarsko bojilo nanosi se samo na povišene elemente, s kojih se obavlja otiskivanje.

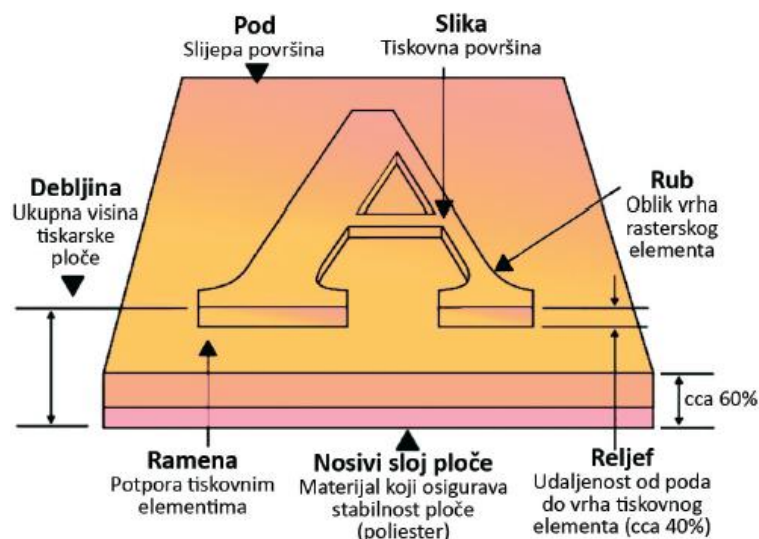
U Europi fleksotiskarski strojevi počinju se razvijati 1980 godine. Sa uređajima koji uklanjaju iz zraka pare od otapala koje su štetne i neugodnog mirisa, a sadrže fleksotiskarske boje. Spomenuti uređaji tako sprečavaju štetno zagađivanje prirode sa sredstvima koja se isparavaju kod sušenja iz tiskarskih boja. Danas se fleksotisak bira iz tog razloga jer boje koje koristi su na vodenoj bazi, tako i ne škodljiva otapala koja se isparavaju iz UV – tiskarskih boja [43].

Razvoj fleksotiska je i dalje u velikom rastu, te profinjenom tehnologijom povećava i kvalitetu tiska što ga čini vodećim postupkom vrlo upotrebljivim za grafičko područje ambalaže. Fleksotisak primarno se razvija za otiskivanje ambalažnih materijala zahvaljujući elastičnim tiskovnim elementima ovom tehnikom tiska moguće je tiskati na najrazličitijim upojnim i neupojnim tiskovnim podlogama kao što su polimerni materijali, fleksibilne folije, papir i kartoni različitih gramatura.

Izrada polimernih ploča (CtP) i "sleeve" tiskovnih formi (CtS) izrađuju se kompjuterski, ovo povećanje kvalitete omogućilo je veće brzine tiska, koji se može izraditi sa istom pločom, čak do nekoliko milijuna otisaka [44].

2.3.1. Tiskovna forma

Budući da se fleksibilne i mekane tiskovne forme sa povišenim tiskovnim elementima koje se mogu prilagoditi neravninama na površini različitih tiskovnih materijala, fleksotisak se najčešće upotrebljava za tiskanje fleksibilne ambalaže. Prije uvođenja tiskovne forme od tekućeg fotopolimera početkom sedamdesetih godina, koristila se klasična tiskovna forma od prirodnog ili umjetnog kaučuka. Takve gumene ploče nisu dobro reproducirale glatke prijelaze, ali sa uvođenjem fotopolimernih ploča taj problem je otklonjen. Glavne prednosti fotopolimerne ploče jesu predvidiva veličina i debljina, reproducibilnost, jednostavna kompjuterska montaža te lakše vođenje procesa tiskanja [45].



Slika 18. Elementi obrađene fotopolimerne tiskovne ploče

U upotrebi su danas najviše jednoslojne tiskarske fotopolimerne ploče koje se osvjetljavaju CtP tehnologijom. Fotopolimerne ploče sastoje se od zaštitnog sloja (zaštitna folija), zatim sloja za lasersku obradu (ablativni sloj ili crna maska), sloj fotopolimera i nosivi sloj koji čini temelj tiskarske ploče i dimenzionalno je stabilan, te elemenata koji imaju određene karakteristike i osiguravaju kvalitetnu reprodukciju (slika 18.) [46].

Prije su se tiskovne forme izrađivale na konvencionalan način i bazirane su na otapalu, te su se izrađivale u nekoliko faza. Danas se tiskovne forme izrađuju na digitalan način CTP (eng., computer to plate) tiskovna forma stvara se digitalnim YAG laserskim graviranjem na fotopolimeru. Tiskovne forme drukčijih su karakteristika: osjetljive su na IR-svjetlost te sadrže crni premaz (masku), koji se laserom uklanja s tiskovnih elemenata i djeluje kao negativ-film tokom UV osvjetljavanja. Drugi digitalni način izrade tiskovne forme bazira se na direktnoj laserskoj ablaciji neželjenih dijelova tiskovne forme, pri čemu ostaju samo tiskovne površine [47].

2.3.2. Sustav za obojenje i bojilo u fleksotisku

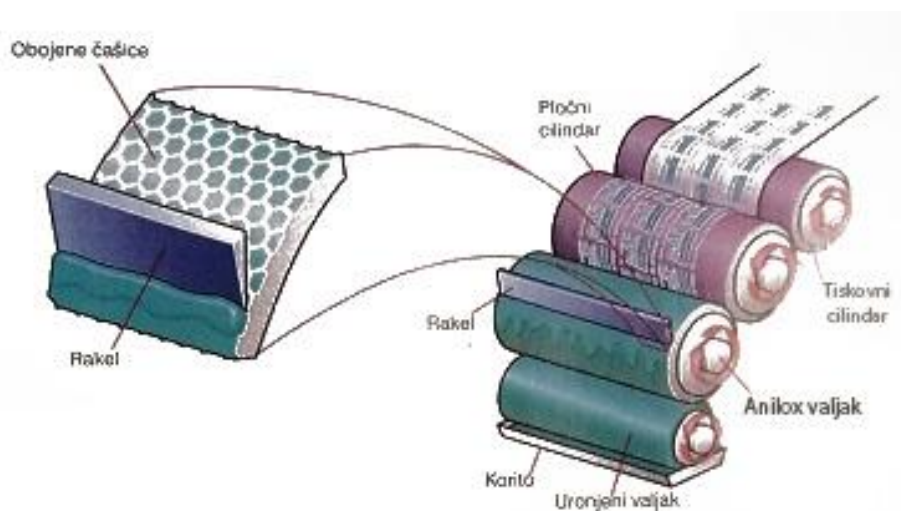
Sustavi za obojenje

Postoje dva izrazito različita sustava za obojenje, češće se koristi zatvoreni sustav s dva noža i sustav sa pojedinačnim nožem. Sustav za obojenje načelno prenosi bojilo počevši od aniloks

valjka preko tiskovne forme koja se nalazi na temeljnom cilindru do tiskovne podloge posredstvom pritiska na tiskovni cilindar. Rakel skida višak bojila s aniloks valjka, a kutovi oštrice u odnosu na dodirnu točku na zatvorenom sustavu su predefinirani.

Sustav za obojenje preko gumenog valjka

Kod jednog fleksotiskarskog agregata s dva valjka, uronjeni valjak (gumirani) okreće se u koritu iz kojeg uzima tekuću boju koju nanosi u čašice ili šalice za boju na anilox valjku (slika 19.).



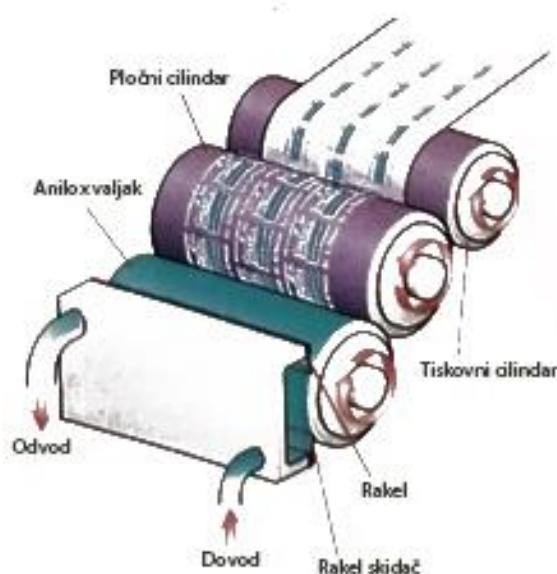
Slika 19. Sustav za obojenje sa dva valjka s klasičnim rakelom/nožem

Preko aniloks valjka postavljen je rakel/nož koji skida višak bojila s njegove površine ostavljajući je samo u čašicama. Mekano gumirani – uronjeni valjak ima blagi kontakt sa anilox-valjkom. Kada nema kontakta između ta dva valjka onda je i prijenos boje prekinut. Šalice na anilox – valjku se pune tekućom tiskarskom bojom tako da na tiskovnu plou dolazi točno dozirana količina boje odnosno količina koja osigurava kvalitetnu reprodukciju.

Sustav za obojenje sa sistemom rakela i komore za boju

Kod sistema za bojanje koji čini jedna komora sa sistemom dva rakela/noža otpada upotreba korita za sadržaj bojila i uronjenog valjka. Danas je česta primjena ovog sustava za obojenje u sistemu fleksotiska. Sastoji se od dva rakela: plastičnog rakela postavljenog suprotno smjeru vrtnje te čeličnog rakela postavljenog u smjeru vrtnje aniloks valjka. Rakeli su međusobno

udaljeni 5 cm, ali može varirati ovisno o proizvođaču. Rakel suprotan smjeru vrtnje valjka skida višak bojila, a drugi rakel zatvara komoru u kompaktnu cjelinu. Jedan rakel smješten je pod kutem suprotnim od rotacije rastriranog valjka, pri čemu odstranjuje bojilo sa slobodnih površina, a drugi rakel drži bojilo unutar komore. Tiskarsko se bojilo kod ovog sustava dovodi pod pritiskom, stalno cirkulira i puni ćelije anilox- valjka. Sustavi s komorom ili komornim rakelom omogućuju bolju i precizniju kontrolu prijenosa bojila, smanjuju isparavanje otapala i povećavaju stabilnost bojila (slika 20.).



Slika 20. Sustav za obojenje sa komorom za boju i sistemom rakela

Ovaj sustav za obojenje omogućava bolju kontrolu korištenja bojila, a stabilnija viskoznost bojila rezultat je kvaliteta tiska. Također ima prednost očuvanja okoliša jer sprječava emisiju štetnih tvari iz bojila u atmosferu [48].

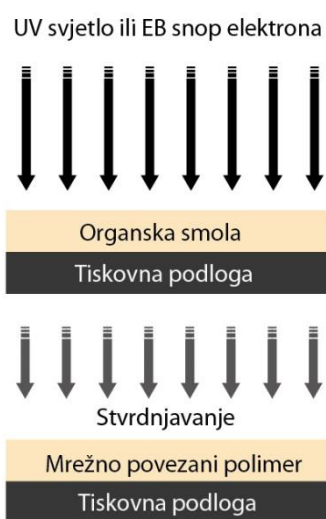
Bojilo kod fleksotiska

Pravilno podešena viskoznost fleksografskih bojila izuzetno je značajna za postizanje visoke kvalitete reprodukcije. Postoje tri tipa bojila u fleksotisku, a to su UV bojila, bojila bazirana na organskim otapalima i bojila bazirana na vodi. Ona moraju zadovoljavati zahtjeve kao što su

dobra topljivost, niska viskoznost (0,05-0,5 Pa.s), visok sadržaj krute tvari, visoki sjaj otiska, velika stabilnost u tisku i brzo sušenje na podlozi [49].

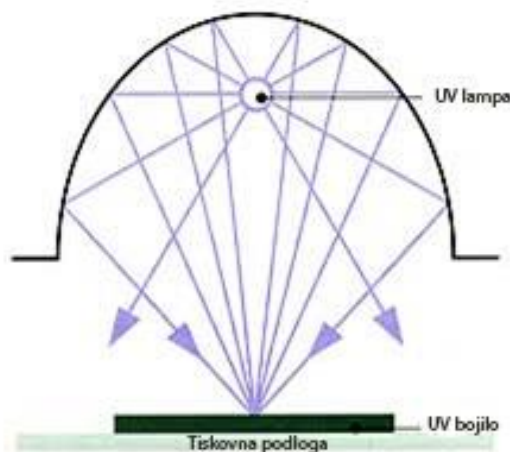
UV bojila

UV bojilo je najnoviji tip bojila kod fleksotiska. Primjena takvih bojila raste iz dana u dan i to su bojila koja se suše pod utjecajem ultraljubičastog (UV) zračenja. Sušenje se odvija pod utjecajem zračenja snopova elektrona, a oni se skraćeno nazivaju EB (Electron Beam) bojila. Prema sastavu UV bojila mogu se podijeliti na kationska bojila i bojila sa slobodnim radikalima. Glavna prednost ovih tiskarskih bojila je izrazito brzo sušenje, prvenstveno na neupijajućim podlogama, bez stvaranja hlapivih organskih spojeva (VOC). UV bojila ne suše na zraku nego stvrdnjavaju djelovanjem UV zračenja u rasponu od 200-400 nm tako da ne pokazuju tendenciju sušenja u čašicama aniloks valjka. UV bojila se ponašaju kao tekući polimer. Kada se bojilo izlaže UV zračenju, dolazi do fotoinicirane polimerizacije odnosno stvaranja krutog sloj boje [50].



Slika 21. Stvrdnjavanje bojila pod snopom zračenja

UV bojila na određenim polimernim tiskovnim podlogama ne prihvataju se dobro pa ih je prethodno potrebno površinski obraditi koronom. UV zračenje, a posebno EB zračenje jesu zračenja manjih valnih duljina pa su opasna za ljudsko zdravlje, te uređaji moraju biti oklopljeni (slika 22.).



Slika 22. Djelovanje UV lampe na flekso tiskarskom stroju

Uređaj i UV lampe relativno su značajan trošak, a moguća je i nabava dodatne opreme koja odvodi toplinu iz tiskarskog stroja. Njihovo zračenje nije samo u UV području nego se proteže i u IR područje, koje je negativno jer samo zagrijava površinu tiskovne podloge. Kako bi se zagrijavanje i negativni učinci stabilizirali, neki strojevi se opskrbljuju poput lampi u obliku parabole, površinski premazanih te hlađene vodom ili zrakom.

Bojila na bazi otapala

Bojila na bazi otapala ili solventa (engl. Solvent based ink) primjena im je povezana uz brzo sušenje, funkcionalnost i široku primjenu. Daju odlične rezultate na neupijajućim površinama kao što su polimerne folije (PVC, OPP, BOPP, PE, PP, PET). Bojilo sa organskim otapalima suši se prvenstveno hlapljenjem. Kako bi proces sušenja poslije otiskivanja što prije započeo dodatno se potpomaže zagrijavanjem. Bojilo prilikom sušenja otpušta tekuće komponente, smola se izluči kao krutina i stvara čvrste pigmente na površini tiskovne podloge. Otapala u tim bojilima, hlapivih organskih spojeva (engl. Volatile Organic Compounds – VOC) su otrovne kemikalije i problem su sigurnosti na radu jer mogu uzrokovati zdravstvene probleme. Iz tog razloga, gdje god su bila primjenjiva, počela koristiti bojila na bazi vode. Ali, rad sa vodenim bojilima na podlogama poput folija stvara određene probleme.

Bojila na bazi vode

Bojila na bazi vode (engl. Water based ink) još uvijek sadrže određen udio organskog otapala, koji je potreban za ubrzavanje procesa sušenja. Koristi se za tisak kartona i papira. Tisak na podlogama takve vrste zbog upijajućih svojstava vlakana papira je vrlo uspješan pa se tako voda djelomično apsorbira u podlogu, a dijelom ispari u okolinu. Ali je iz tog razloga uporaba ovih bojila ograničena na otiskivanje upojnih materijale, zbog procesa sušenja koji se bazira na isparavanju i penetraciji vode u tiskovni materijal. Prilikom otiskivanja na neupojne materijale, može doći do sušenja bojila na rastriranom valjku, što negativno utječe na uvjeta rada i kvalitetu otiska [4].

Elektrobeem bojila (EB)

EB tiskarska bojila stvrdnjavaju se djelovanjem snopa elektrona. Za razliku od UV inicirane polimerizacije, EB polimerizacija ne treba fotoinicijatore za pokretanje tog procesa.

Ovu vrstu sušenja bojila moguće je izvesti na kraju tiskovnog procesa, s izrazito zadovoljavajućom kvalitetom reprodukcije. Pomoću EB bojila može se tiskati veliki broj različitih materijala, obično sa predobrađenom površinom tiskovne podloge pomoću korone u liniji sa tiskom radi lakšeg prihvatanja i prijanjanja bojila. PET, PP i PE tretirane folije daju dobre rezultate [13].

2.3.3. Tisak etiketa u fleksotisku

Tisak etiketa u tehnici fleksotiska je u velikom porastu. Kvaliteta tiska se sve više poboljšava i nekada se su većinom tiskale samoljepljive etikete za koje možemo reći da su alternativa etiketa stezljivim filmom, etiketiranja rastezljivim filmom, toplinski transfer i «in-mould» etiketiranja.

2.3.3.1. "Shrink sleeve" etiketa ili etiketiranje termoskupljajućim filmom

Sustav pakiranja sa etiketom u obliku rukavca koji se navlači na ambalažu pa se nakon toga termički steže i preuzima pravilan ili nepravilan oblik ambalaže odnosno proizvoda [51]. Prvo se tiska na ravnu tiskovnu podlogu, sam film odnosno tiskovna podloga je prozirna. Materijal koji se najviše koristi u ovoj metodi jest poli(vinil-klorid) (PVC), koji zauzima 90% udjela na tržištu. Nakon njega materijali koji također zauzimaju veći udio na tržištu jesu polietilen (PE) i

polipropilen (PP). Ova vrsta termoskupljajućih etiketa povećava upotrebu novog načina dizajniranja i moguća je upotreba na različitim ambalažnim proizvodima [52].

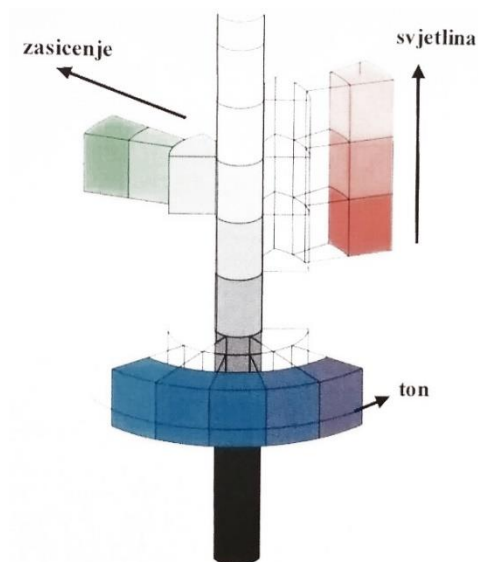


Slika 23. Primjena termoskupljajućih etiketa na ambalaži

2.3.4. Kolorimetrija kod višebojne reprodukcije

2.3.4.1. Doživljaj boje

Kada opisujemo boje služimo se njihovim psihičkim i psihofizičkim karakteristikama, tako svaku boju određuju tri psihičke veličine: ton, zasićenje i svjetlina (slika 24.). Preko psihofizičkih veličina vežu se fizikalna mjerenja podražaja i doživljaj boje koji podražaj budi [53]. Opažena boja ovisi o spektralnoj raspodjeli podražaja boje, veličini, obliku, strukturi i okruženju područja podražaja, tako i o adaptaciji vizualnog sustava promatrača. Može se reći da je boja fenomen koji uključuje izvor svjetlosti (iz vidljivog dijela spektra elektromagnetskog zračenja), promatrani objekt (svojstva apsorpcije, refleksije, raspršivanja i transmisije svjetlosti) i promatrača (osjet vida i vizualni sustav čovjeka). Doživljaj boje je podražaj pobuđen u promatraču uslijed interakcije između objekta i različite valne duljine svjetlosti [54].



Slika 24. Karakteristika boje

TON boje (hue) je atribut vizualnog doživljaja na temelju kojeg točno definiramo određenu boju, ovisno o dominantnoj valnoj duljini, npr. plavu, zelenu, crvenu... (slika 25.)



Slika 25. Ton boje

ZASIĆENJE (saturation) je udio pojedinih valnih duljina u nekom tonu boje.



Slika 26. Zasićenje

SVJETLINA (lightness) Obilježje vizualnog osjeta koji opisuje sličnost boja s nizom akromatskih boja od crne preko sive do bijele. Udio crne u nekom tonu boje.



Slika 27. Svjetlina

2.3.4.2. Mjerenje boja

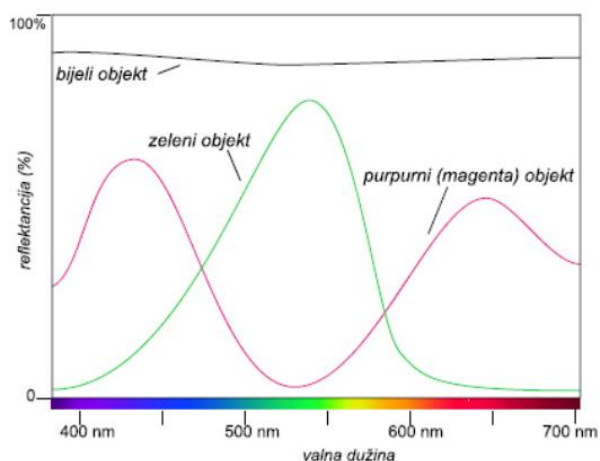
Procesom tiska potrebno je postići reprodukciju što sličniju originalu. U grafičkoj tehnologiji mjerne mogućnosti su velike i važna je potreba za objektivnom usporedbom boja.

Mjerenje boja ima dva zadatka: brojčano izražavanje razlike dviju boja i izrada normi i dopuštenih odstupanja. Ono što se zapravo podrazumjeva pod mjerenjem boja je podražaj ili stimulus tj. svjetlo koje je ušlo u promatračevo oko i u njegovom mozgu proizvelo doživljaj boje. Mjerni instrumenti u grafičkoj tehnologiji podijeljeni su u tri kategorije: kolorimetri, denzitometri i spektrofotometri. Razlika između tih kategorija je osjetljivost detektora, te broj i vrsta filtera koji upotrebljavaju uređaji.

Kolorimetrija predviđa boje, na način kako ih doživljava prosječan promatrač. Kolorimetrija se s obzirom na metode analize boja i primjenu dijeli na vizualnu (vizualni tristimulusni kolorimetar i atlasi boja) i instrumentalnu (spektrofotometrijska analiza i instrumentalni kolorimetar) [55]. Kolorimetri mjere svjetlost kroz filtere koji simuliraju i odgovaraju doživljaju boje koji postiže ljudsko oko te imaju mogućnost numeričkog prikaza dobivenih vrijednosti u nekom od CIE prostora boja. Većina kolorimetara posjeduje mogućnost prikaza u CIE XYZ, CIE $L^*a^*b^*$, CIE LUV prostoru boja, kao i izračun ΔE 16 razlike među bojama. Denzitometar se često upotrebljava u grafičkoj industriji. Tijekom procesa tiska s pomoću njega osigurava se pridržavanje propisanih normativa s obzirom na različite tiskovne podloge, te se prati optimalna gustoća bojila. Denzitometri mjere omjer između intenziteta svjetlosti koje je zasjalo na površini ili prošlo kroz površinu promatranog predmeta i svjetlosti koje je doseglo detektor instrumenta.

Denzitometri koji sadržavaju filtere odgovarajućih specifičnih valnih duljina reflektiranim od strane cyan, magenta, žutog i crnog bojila koriste se najčešće u grafičkoj industriji.

Spektrofotometrija određuje refleksiju, omjer između intenziteta svake pojedine valne duljine svjetlosti pristigle na površinu i svjetlosti jednake valne duljine reflektirane prema detektoru instrumenta. Koriste se u području vidljivog dijela spektra od 380 do 730 nm [56]. Podaci dobiveni spektrofotometrijskim mjerenjem potpuniji su od podataka dobivenih kolorimetrijskom metodom i predstavljaju jasan opis boje izmjeren energijom svijetla na određenoj valnoj duljini.



Slika 28. Prikaz spektrofotometrijske krivulje s obzirom na različito obojene objekte [55]

2.3.4.3. Boje na ambalaži

Ambalaža je ta koja prodaje proizvod i može se reći da na neki način hipnotizira kupca. Dokazano je da više od 80% informacija čovjek prima putem vida. Ljudsko oko omogućava osjet vida i osjet boja. Zahvaljujući sposobnosti propuštanja svjetlosti kroz rožnicu, čovjek percipira boju. Rožnica fokusira svjetlost na stražnji dio oka stvarajući obrnutu i umanjenu sliku. Šarenica, koja se nalazi s prednje strane oka, je zadužena za regulaciju ulazne energije svjetlosti. Mrežnica, ovojnica oka, sastoji se od dvije vrste fotoosjetljivih stanica, štapići i čunjići. Fotoosjetljive stanice povezane su živcima s mozgom. Doživljaj boje ovisi o reakciji mozga na određenu stimulaciju. Elektromagnetska energija iz svjetlosti pretvara se u živčane impulse koji se prenose putem živčanih vlakanca i interpretiraju se kao slika. Boje koje su najatraktivnije na ambalaži jesu: crvena, narančasta, plava, crna, zelena, žuta, ljubičasta i siva (slika 29.). Tri su glavna elementa koja uvjeravaju kupca da uzme neki proizvod sa police u trgovini, a to su:

1. Ilustracije
2. Boja
3. Simboli i riječi određenog proizvoda



Slika 29. Najatraktivnije boje na ambalaži

Boje koje imaju duže valne dužine imaju više utjecaja na doživljaj proizvoda. U prvom redu tu je crvena boja. Da bi se postigli određeni efekti u marketingu boje na ambalaži je potrebno koristiti poznavajući kako djeluju na ljude i kakav efekt se želi postići. Ako se odredi kriva boja može doći do neželjenog efekta određenog proizvoda i postići potpuno suprotan učinak željenom. Utvrđeno je kako djeca više vole boje od odraslih. Djeca vole tople i jake boje, crvenu, narančastu, magentu i žutu. Dok kod odraslih ovisi o još nekim značajkama, pa tako žene više vole blago plave i blago zelene boje, dok muškarci i ljudi zrelije dobi općenito više vole tamne boje. Ljubičastu i magentu boju dobro je koristiti za pakiranje luksuznih proizvoda kao npr. zlata ili skupe odjeće. Luksuzni proizvodi vežu se također za crnu, bijelu i metalne boje [57].

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Metodologija i plan istraživanja

Eksperimentalni dio ovog rada započet će izradom tiskovne forme za fleksografski tisak na način da će se na tiskovnoj formi nalaziti svi potrebni elementi za objektivnu i subjektivnu kontrolu kvalitete otisnutog materijala. Tiskovna forma sastojat će se od elemenata kojima se definira gustoća obojenja procesnih tiskarskih boja te od polja aditivne greške za ustanovljavanje prihvatanja boje. Isto tako, na tiskovnoj formi nalazit će se polja za kontrolu prirasta gustoće obojenja u deset jednakih intervala te će uz ta polja biti definirana polja za kontrolu raspona gustoće obojenja u vrijednostima koje su standardizirane za fleksografski tisak. Kako se svaka tehnika tiska pa tako i fleksotisak odvijaju u jednom smjeru, za potrebe istraživanja deformacija rasterskih elemenata iste će se analizirati u različitim smjerovima te će se za to istraživanje otiskivati i polja za kontrolu kvalitete prijelaznih tonaliteta kako bi se ustanovila korelacija smjera deformacije rasterskih elemenata. Za ustanovljavanje kolorimetrijskih vrijednosti otiskivanja u dijelu sivih tonova na tiskovnoj formi nalazit će se i polja za kontrolu sivog balansa. Osim navedenih polja kojima je moguće obaviti objektivnu kontrolu kvalitete tiska, na tiskovnoj formi će se reproducirati višebojne fotografije s dominantnim tonalitetima koje će služiti za procjenu subjektivne kvalitete standardnog promatrača.

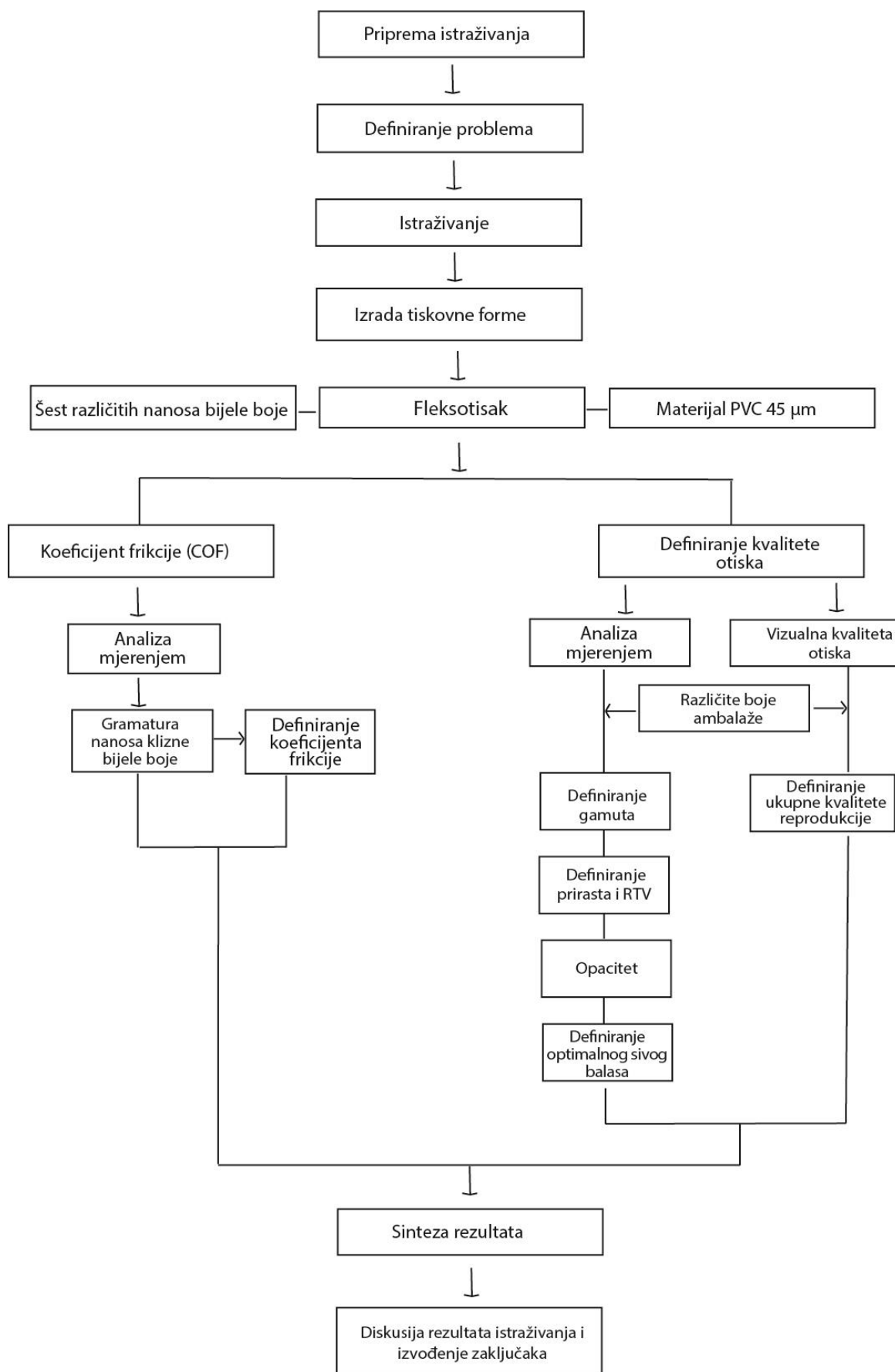
Istraživanje definiranih polja s tiskovnih formi će se provesti laboratorijskim mjerenjem kolorimetrijskih promjena tristimulusnih vrijednosti reflektiranih boja. Promjene u deformaciji rasterskih elemenata će se ustanovljivati u mjerenju razlike stvarne i definirane veličine rasterskih elemenata Murray-Daviesovom metodom te će se navedena polja analizirati pod mikroskopskim povećanjem te izračunavanjem promjena dimenzije rasterskih elemenata u različitim smjerovima otiskivanja. Kod ovih istraživanja pažnja će se posvetiti reprodukciji malih i velikih rastertonskih vrijednosti u dijelu granične reprodukcije koja je definirana međunarodnim standardima koji će se primijeniti i za ustanovljavanje kvalitete sivog balansa. Kako je sivi balans jedan od glavnih parametara kvalitete otiskivanja, posebno u subjektivnoj ocjeni kvalitete, sivi balans će biti definiran u različitim vrijednostima kako bi se mogla ustanoviti optimalna kolorimetrijska vrijednost koja je u izravnoj ovisnosti o kliznosti materijala.

Subjektivna procjena kvalitete tiska obavljat će se na višebojnim reprodukcijama metodom binokularnog simultanog usuglašavanja tako da će se promatrati otisci koji su tiskani na različitim vrijednostima gustoće obojenja klizne bijele boje. Navedenom metodom bit će moguće ustanoviti male promjene u kvaliteti doživljaja reprodukcija koje će ovisiti o

kolorimetrijskim promjenama uslijed interakcije s različitim vrijednostima gustoće obojenja klizne bijele boje.

Evaluirat će se kliznost materijala na gotove otiske dobivene fleksografskim tiskom procesnih boja. Na otiske će se nanositi klizna pokrivna bijela boja u različitim gustoćama obojenja. Navedene promjene gustoće obojenja dobit će se promjenom u veličini i linijaturi čašica anilox valjka. Navedenim promjenama u nanosu bijele boje dobit će se različite kliznosti materijala pri čemu će se ustanoviti granične, ali i optimalne vrijednosti kliznosti kako bi proces nanošenja termoskupljajućih etiketa tekao nesmetano u direktnoj proizvodnji. S različitim gustoćama obojenja klizne bijele boje utjecat će se na kolorimetrijske promjene gotovog proizvoda jer će se sva mjerenja kolorimetrijskih promjena i subjektivne procjene kvalitete reprodukcija.

Shema metodologije i plan istraživanja prikazana na (slici 30.).



Slika 30. Shema metodologije i plan istraživanja

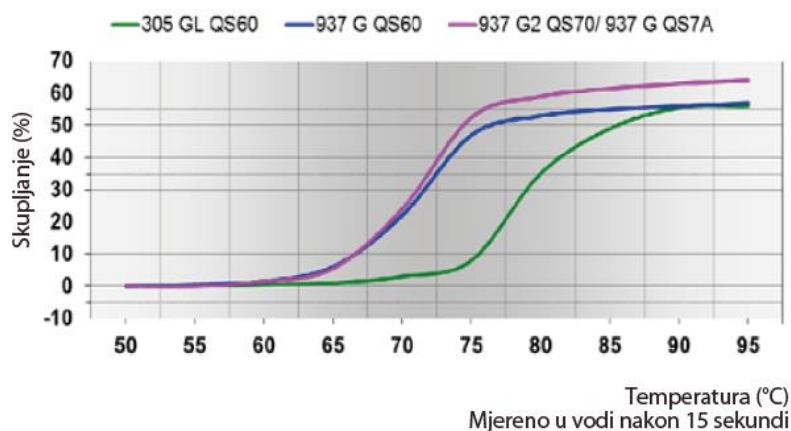
3.1.1. Korišteni materijali

3.1.1.1. Tiskovna podloga

Uzorci polimerne fleksibilne ambalaže na kojem su se vršila mjerenja u ovom znanstvenom radu rađeni su na polimernom materijalu polivinil klorid (PVC) proizvođača Bilcare Solutions. Ovaj polimerni materijal razvijen je na krutom polivinil klorid filmu koji se koristi za izradu termoskupljajućih etiketa. Ovi se PVC filmovi odlikuju izvanrednim optičkim svojstvima, izrazito glatkom obradom površine i dosljednim poprečnim skupljanjem. Na taj materijal može se tiskati sa tri vrste tiskarskih procesa a to su fleksotisak, rotogravura i ofsetni tisak. Ovaj polimerni film osigurava najbolje rezultate za termoskupljajuće etikete, to su visoka tehnička svojstva, a tako i promotivna svojstva što znači nanos materijala preko cijele forme na koju se aplicira i materijal preko kojeg se može otisnuti dizajn preko njegove cijele površine.

Tablica 4. Tehničke specifikacije polimernog materijala PVC

Vrsta materijala	SF 305 GL	SF 937 G	SF 937 G2	SF 937 G
	QS60	QS60	QS70	QS7A
Debljina filma (μm)	40, 50	40, 50	40, 45, 60	47, 50
Skupljanje: (mjereno na 90°C, 15 sek. u vodi) • dijagonalan smjer (%) • smjer stroja (%)	57 +/-3	57 +/-3	63 +/- 3	64 +/- 2
	4 +/- 2	4 +/- 2	4 +/- 2	4 +/- 2
Gustoća (g/cm³)	1.33	1.32	1.32	1.32
Boja	transparentna			
Površina	sjajna / sjajna			



Slika 31. Krivulje skupljanja PVC filma eksperimentalno mjereno u vodi (parni tuneli u proizvodnji) nakon 15 sekundi °C

3.1.1.2. Tiskovna boja

Otisak koji će se ispitivati biti će tiskan bojilima koja se suše UV energijom proizvođača Paragon Inks. Ove vrste tiskarskih bojila jedino se mogu osušiti djelovanjem UV zračenja odgovarajuće valne duljine. U sastav UV tiskarskih bojila ulaze: pigmenti, akrilni monomeri (za kontrolu viskoznosti), akrilni prepolimeri, fotoinicijatori i dodatci. Sušenje se odvija polimerizacijom radikala. Fotoinicijatori djelovanjem UV svjetla reagiraju stvarajući radikale koji se vežu s monomerima i prepolimerima. Pri tome nastaje polimerizacija umrežavanjem, odnosno suhi sloj boje.

Tablica 5. Karakteristike 'UV bojila' [13]

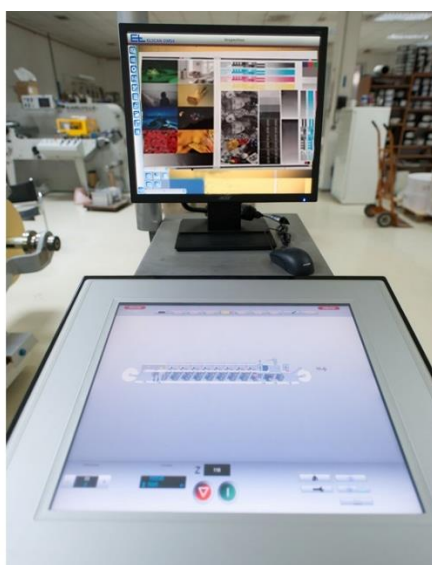
	Svjetlostalnost (1-8)	Otpornost na lužine	Otpornost na kiseline
C	8	+	+
M	4	+	+
Y	5	+	+
K	8	+	+
W	-	+	+

3.1.1.3. Korišteni stroj

Uzorci ispitivani za eksperimentalni dio rada otisnuti su na stroju za fleksotisak Nilpeter FA 4. Ovaj stroj omogućava vrhunsku kvalitetu tiska, nisku razinu potrošnje energije i sirovina, te maksimalno očuvanje okoliša. Tiskarski stroj FA nove generacije modularno je građen, najnovije tehnologije tiska iz role (slika 32.). Konfiguracija stroja je ulagači aparat, dupla Corona za obradu materijala eliktricitetom prije samog otiskivanja sa obje strane materijala. Na stroju dalje se nalazi 8 tiskovnih jedinica svaka sa UV sušenjem tiskarske boje, dok zadnja jedinica ima mogućnost UV sušenja ali i VD (vododisperzivno) sušenja boje. Jedinica za štancanje i ricanje materijala nalazi se prije izlagačkog aparata. Sa cijelom konfiguracijom stroja upravlja se sa centralne konzole koja je visokosofisticirana i inovativna (slika 33.).

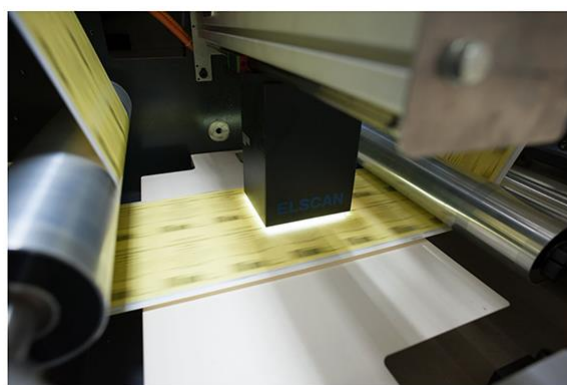


Slika 32. Nilpeter FA 4, *Izvor: Grafplex d.o.o*



Slika 33. Upravljačka centralna konzola stroja Nilpeter FA 4, *Izvor: Grafplex d.o.o*

Vizualna kontrola otiskivanja prati se putem kamere koja je smještena na kraju tiskovnih jedinica (slika 34.) radi brzine otiskivanja.



Slika 34. Kamera za kontrolu tiska, *Izvor: Grafplex d.o.o*

Tablica 6. Karakteristike osnovne stroja Nilpeter FA 4

Karakteristike stroja Nilpeter FA 4	mm/inches
Brzina tiska	0-200 m/min.
Širina role, max.	450 mm (17 ¾")
Širina istiska, max.	430 mm (17")
Ponavljjanje glave	254-635 mm (10" – 25")

3.1.1.4. Korišteni uređaji za mjerenje

Spektrofotometrijska i denzitometrijska mjerenja raditi će se X-Rite eXact uređajem (slika 35.) koji služi za mjerenja na širokom rasponu različitih materijala od papira, filmova, folija do tekstila. Uvjeti pri mjerenju sa spektrofotometrom jesu osvjetljenje D65 s kutem promatranja od 2°, a pri mjerenju s denzitometrom korišteno je osvjetljenje A s istim kutem promatranja. Služi za mjerenje i kontrolu otiskivanja sa svim vrstama bojila specijalnim i konvencionalnim. Kako bi se postigla optimalna točnost u svim slučajevima, integriran je bijeli standard (referentna točka) koji omogućuje automatsku kalibraciju bez potrebe intervencije korisnika. X-Rite eXact omogućuje mjerenje denzitometrijske vrijednosti, prirast rasterskog elementa, prihvaćanje boje na boju (trapping) te spektrofotometrijske vrijednosti (CIE L*a*b*), ali i brojne druge mogućnosti. Osnovne tehničke karakteristike prikazane su (tablicom 7.).

Tablica 7. Osnovne tehničke karakteristike uređaja X-Rite eXact

Karakteristika	Vrijednost
Raspon valnih duljina	400 – 700 nm
Raspon mjerenja	0 – 200 % reflektancija
Brzina mjerenja	2 s
Optička razlučivost	10 nm
Geometrija	45° / 0°
Standardni promatrač	2° / 10°
Mjerna površina	Ø1.5, Ø2, Ø4, Ø6 mm
Standard	ISO 13655:2009



Slika 35. Mjerni uređaj X-Rite eXact

Koeficijent frikcije izmjeren je u laboratoriju prema ASTM 1894 metodi [58]. Mjerni uređaj bio je SST3-XS, RDM (slika 36.) s regulacijom brzine od 1 mm / min do 1000 mm / min +/- 0,5%. Radno se okruženje kretalo unutar temperaturnog raspona od 5-50 ° C. Dinamički koeficijent trenja je kontinuirana prosječna vrijednost dobivena kada film prolazi zadanom brzinom preko određene udaljenosti. Tijekom ovog ispitivanja u laboratoriju, brzina gibanja filma je 100 mm / min na udaljenosti od 100 mm. Folija se preša s težinom od 200 g = 1,96 N. Koeficijent frikcije filmova obično se kreće između 0,2 i 1. Tolerancija je +/- 2 [38].



Slika 36. Uređaj za mjerenje koeficijenta frikcije materijala SST3-XS, RDM

3.2. Rezultati istraživanja

Prije otiskivanja testnih uzoraka izrađena je tiskovna forma koja na sebi sadrži sve potrebne parametre za kvalitetnu provedbu mjerenja i dobivanja rezultata. Na (slici 37.) je prikazana tiskovna forma koja se otisnula sa šest različitih nanosa bijele klizne boje.



Slika 37. Tiskovna forma za provedbu istraživanja

Nakon izvršenog mjerenja rezultati su praćeni preko (tablice 8.) koja prikazuje legendu istraživanja.

Tablica 8. Legenda eksperimentalnog rada

Otisnuti uzorak	Boja podloge bijela	Boja podloge crvena	Boja podloge plava	Boja podloge žuta	Boja podloge zelena	Boja podloge crna/karbon	Boja podloge siva	Nanos klizne bijele boje (g/m ²)	Debljina materijala (μm)	Boja materijala
1	B	C	P	Ž	Z	K	S	3	45	trans.
2	B	C	P	Ž	Z	K	S	5	45	trans.
3	B	C	P	Ž	Z	K	S	6	45	trans.
4	B	C	P	Ž	Z	K	S	7	45	trans.
5	B	C	P	Ž	Z	K	S	8	45	trans.
6	B	C	P	Ž	Z	K	S	9	45	trans.

Uzorci otisnutih materijala definirani su brojevima od 1 do 6 koliko je ukupno različitih nanosa ispitivane klizne bijele boje u g/m². Svaki uzorak od pojedinog nanosa klizne bijele boje

ispitivao se na sedam različitih boja podloga. Koristile su se podložne boje koje najčešće dolaze u realnom sektoru kao podloge za termoskupljajuće etikete, a to su bijela, crvena, plava, žuta, zelena, crna i siva.

3.2.1. Definiranje koeficijenta frikcije

Na svim tiskovnim podlogama provedeno je istraživanje koeficijenta frikcije (COF). Koeficijent frikcije je vrijednost koja služi da se zadovolji norma kako će budući fleksibilni ambalažni materijal kliziti i kretati se na plastičnoj ambalaži na koju se navlači odnosno klizne poput rukavca (slika 38.).



Slika 38. Sliviranje plastične ambalaže termoskupljajućom etiketom, *Izvor: Meteor Grupa – Labud d.o.o.*

Kliznost materijala ovisi kod termoskupljajućih etiketa o količini bijele klizne boje koja se nanosi nakon samog otiska dizajna etikete. U istraživanju provelo se ispitivanje na šest različitih nanosa bijele klizne boje od 3 g/m², 5 g/m², 6 g/m², 7 g/m², 8 g/m² i 9 g/m².

Definirana kliznost materijala predhodi optimalnoj kvaliteti procesa proizvodnje ambalaže kako bi se zadovoljili svi preduvjeti implementiranja na poluproizvod kod pakiranja, te kako bi se izbjegle poteškoće i mogući zastoji na samom stroju za pakiranje.

Mjerenje se vršilo na uređaju SST3-XS, RDM po 20 mjerenja za svaku gramaturu bijele klizne boje prikazanih rezultata u tablicama i grafikonima.

Nakon dobivenih rezultata na uzorcima materijala od n = 20 mjerenja za svaki uzorak različitih nanosa bijele klizne boje dobiven je niz varijabilnih podataka odnosno srednja vrijednost mjerenja čiji rezultati su prikazani tablicama i grafikonima.

Aritmetička sredina pokazuje nam mjesto statističkih podataka na numeričkoj osi i njihov prosjek. To jest, broj je u teorijskom i praktičnom smislu najbliži podacima.

$$(1) \quad \bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [59]$$

Standardno odstupanje je prosječno srednje kvadratno odstupanje brojčanih vrijednosti neke veličine x_1, x_2, \dots, x_n njihove aritmetičke srednje vrijednosti. Standardno odstupanje pokazuje koliko su nam podaci bliski. Manji s , bliži x podacima. Ako je $s = 0$, sve su vrijednosti iste, a x jednaka svim vrijednostima.

$$(1) \quad s^2 = \frac{1}{n} \left[(x_1 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2 \right]$$

$$(2) \quad s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad [59]$$

U ovom istraživačkom radu, kroz rezultate 20 mjerenja koeficijenta frikcije i nakon izračunatih prosječnih vrijednosti rezultata, standardno odstupanje predstavljeno je za svaki materijal zasebno. Proračun pokazuje koliko dobiveni rezultati odstupaju od prosjeka.

Relativno standardno odstupanje ili koeficijent varijacije (v) je omjer standardnog odstupanja i aritmetičke srednje vrijednosti (\bar{x}) pomnožen s 100.

$$\text{koeficijent varijacije (\%)} = \frac{\text{standardna devijacija}}{\text{srednja vrijednost koeficijenta frikcije}} \times 100 \quad [38]$$

Objedinjeni rezultati prikazani u (tablici 9.).

Tablica 9. Podatci srednje vrijednosti koeficijenta frikcije (COF), standardnu devijaciju i koeficijenta varijacije

Materijal (45 μm)	Srednja vrijednost koeficijenta frikcije (COF) (n=20)	Standardna devijacija – COF (Koeficijent varijacije)
Uzorak 1	0,164	0,005 (3,04%)

Uzorak 2	0,155	0,012 (7,74%)
Uzorak 3	0,161	0,008 (4,96%)
Uzorak 4	0,159	0,008 (5,03%)
Uzorak 5	0,171	0,007 (4,09%)
Uzorak 6	0,176	0,007 (3,97%)

Na kraju se računala srednja vrijednost standardne pogreške. Standardna pogreška je važan pokazatelj koliko statistika uzorka predstavlja točnu procjenu postavljenog parametra. Standardnu pogrešku srednje vrijednosti uzorka predstavlja formula:

$$SE = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad [60]$$

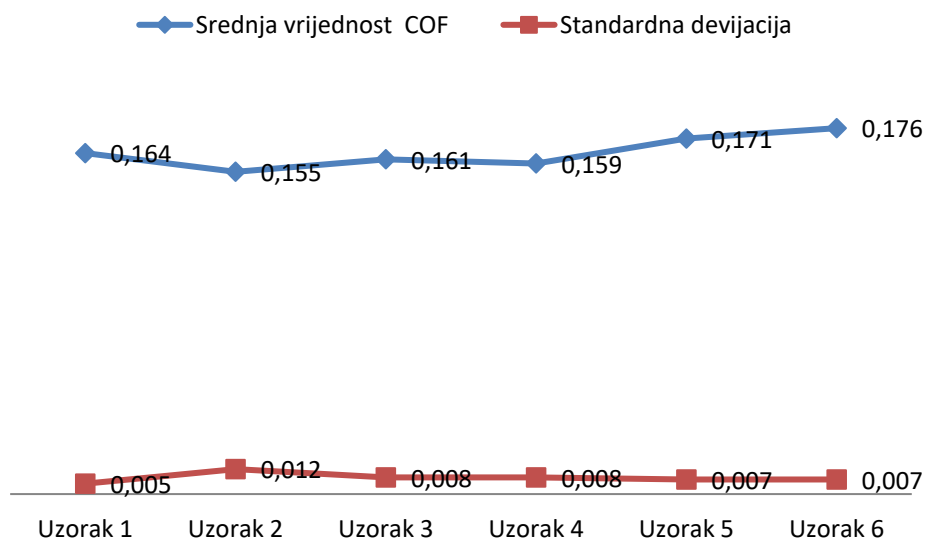
gdje je SE – standardna pogreška, σ - standardno odstupanje

Formula pokazuje da je standardna pogreška jednaka standardnom odstupanju podijeljenom s kvadratnim korijenom iz n . To ujedno ukazuje da što je veličina uzorka veća, to je manja standardna pogreška.

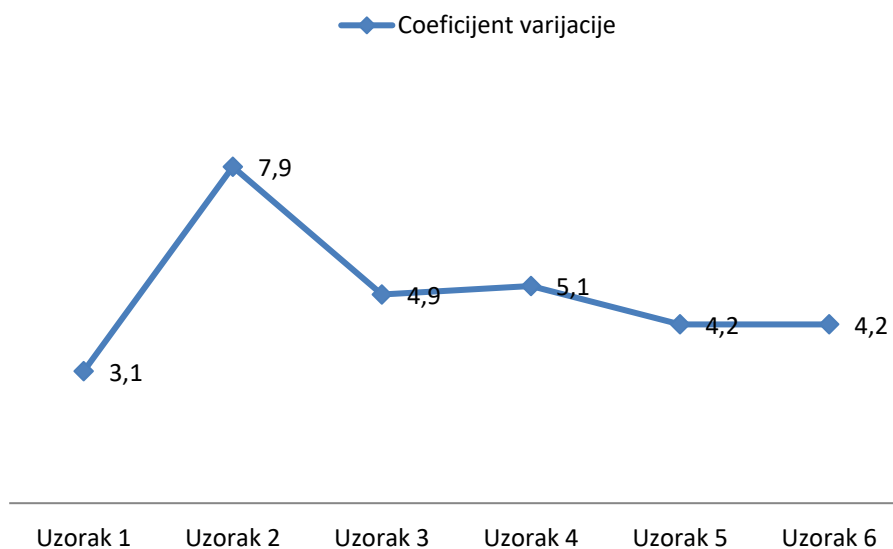
Tablica 10. Podatci srednje vrijednosti standardne pogreške (SE)

Materijal (45 μm)	Srednja vrijednost standardne pogreške (n=20)
Uzorak 1	0,0011
Uzorak 2	0,0027
Uzorak 3	0,0017
Uzorak 4	0,0018
Uzorak 5	0,0016
Uzorak 6	0,0016

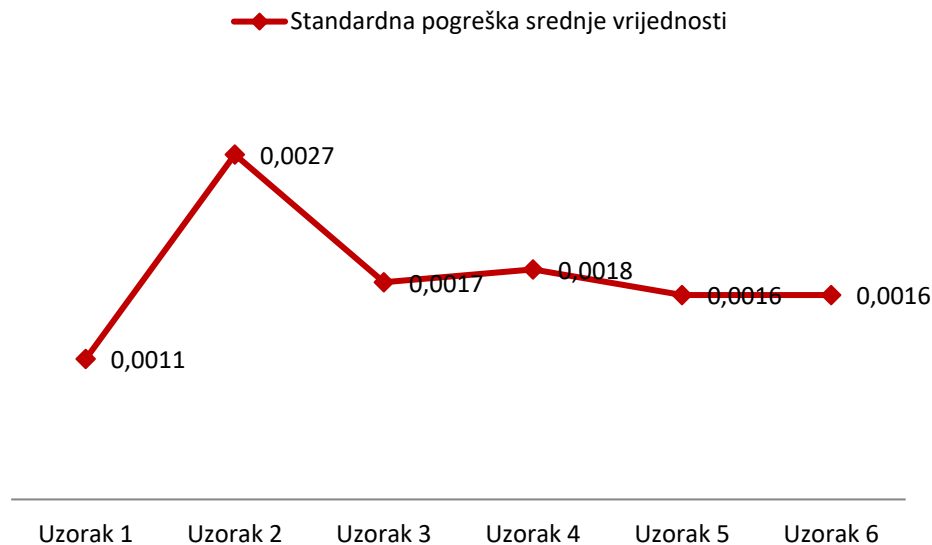
Standardna pogreška srednje vrijednosti može pružiti grubu procjenu intervala kojem će vjerojatno pripadati srednja vrijednost mjerenih uzoraka. Znači, ta pogreška je mjera raspršenja srednjih vrijednosti u razdiobi uzorkovanja [60].



Slika 39. Grafički prikaz rezultata srednje vrijednosti klizne bijele boje i standardna devijacija za COF za uzorke od 1-6.



Slika 40. Grafički prikaz rezultata koeficijenta varijacije za koeficijent frikcije za uzorke od 1-6.



Slika 41. Grafički prikaz rezultata standardne pogreške srednje vrijednosti za koeficijent frikcije za uzorke od 1- 6.

3.2.2 Definiranje prirasta RTV reprodukcije

U tisku se javljaju određene deformacije rasterskog elementa u ovisnosti o mehaničkim procesima prilikom kojih neki čimbenici utječu na prijenos bojila na tiskovnu podlogu. Utječu temperatura i vlaga okoline, karakteristike tiskovne podloge i tiskovnog bojila, adhezivne i kohezivne sile bojila i tiskovne podloge, pritisak između cilindara i valjaka. Uvijek postoje određene geometrijske deformacije rasterskog elementa, otiskivanje idealnog rasterskog elementa gotovo je nemoguće [61] .

Problem koji se vrlo često događa u tisku jest pojava prirasta rastertonskih vrijednosti i moguće ga je riješiti tek kada se prvo ustanovi sama vrijednost prirasta rastertonskih vrijednosti te se određenim metodama smanji prije ili u toku tiska te se nastoji standardizirati i kompenzirati. Prirast RTV (engl. Dot Gain) neće se u tisku nikada u potpunosti kompenzirati jer će rezultirati presvijetlom reprodukcijom. Ljudsko oko očekuje tamniju reprodukciju i veće kontraste na istoj, prema tome ljudskom oku ne odgovara presvijetla reprodukcija. Sukladno tome, kontrolirani prirast RTV u skladu sa standardom je u potpunosti realna pojava [62].

Jedan od glavnih ciljeva grafičke tehnologije je postizanje reprodukcije što sličnije originalu, te je uspješno smanjenje prirasta RTV jedan od glavnih i osnovnih uvijeta preduvijeta za postizanje kvalitetne reprodukcije.

Ukupni prirast rastertonske vrijednosti računati se može za jednobojne reprodukcije Yule i Nielsenovom jednačbom (1)

$$R(a) = (aR_s^{\frac{1}{n}} + (1 - a)R_0^{\frac{1}{n}})^n \quad (1)$$

gdje je $1 \leq n \leq 2$, za površine pokrivene sa bojom (a) i refleksiju sa punog polja (R_s) te refleksiju sa tiskovne podloge (R_0).

Kod višebojnog tiska uzimaju se i parametri distribucije svjetlosti, pa rezultat tiska sve četiri boje ukupnog prirasta rastertonskih vrijednosti prikazuje kao produkt

$$R_{CMYK}(xy\lambda) = R_c(xy\lambda)R_m(xy\lambda)R_y(xy\lambda)R_k(xy\lambda) \quad (2)$$

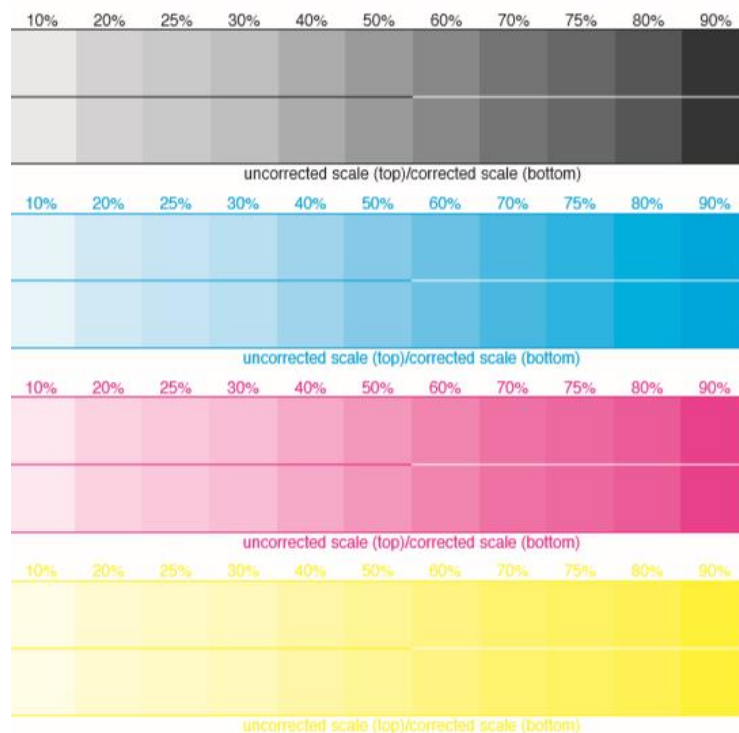
gdje je λ valna dužina svjetlosti

Prema tome kada se želi izračunati stvarna RTV određenog polja $F(a)$, tada je prema Murray i Daviesu:

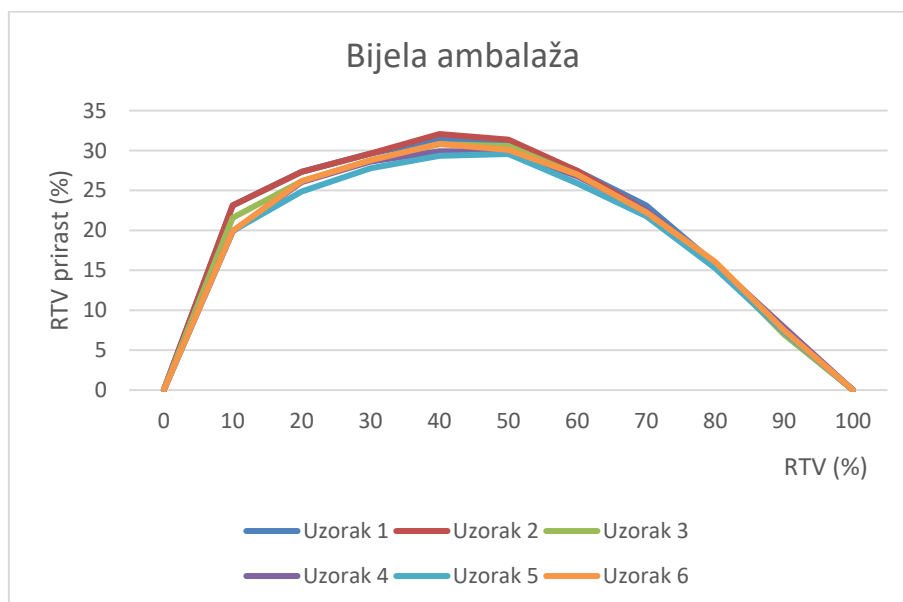
$$F(a) = \frac{1 - 10^{-D_R}}{1 - 10^{-D_{pp}}} \times 100\% \quad (3)$$

gdje je D_R gustoća obojenja polja koja se mjeri, a D_{pp} gustoća obojenog punog polja.

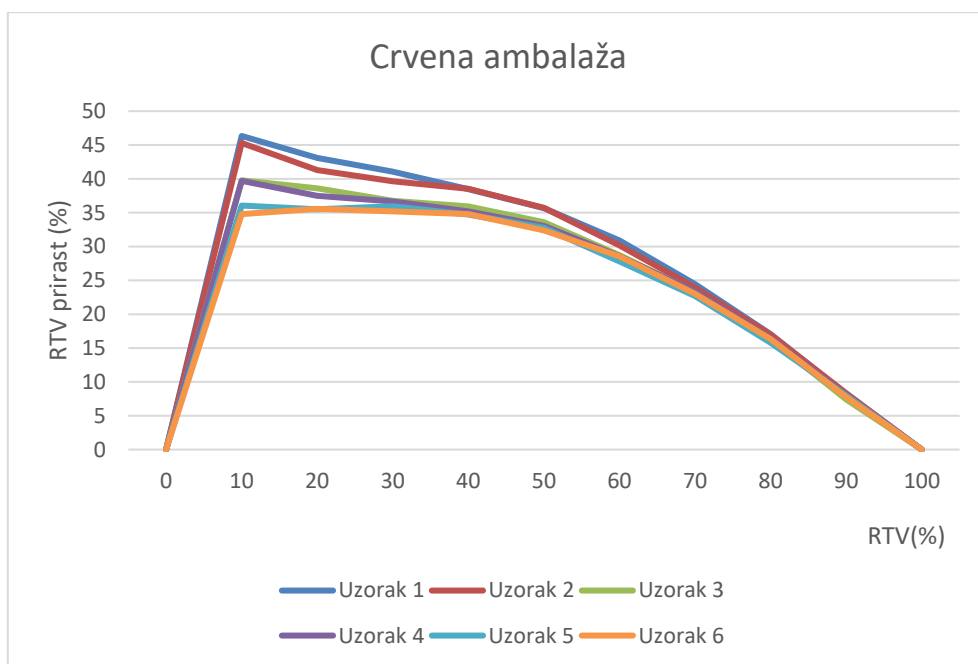
Analiza geometrijskog i optičkog prirasta RTV je analizirana uz pomoć jednačbe Murray-Davies [4]. Ispitivanje je rađeno na kontrolnom stripu otisnutom s rastertonskim vrijednostima od 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, i 100 % (slika 42).



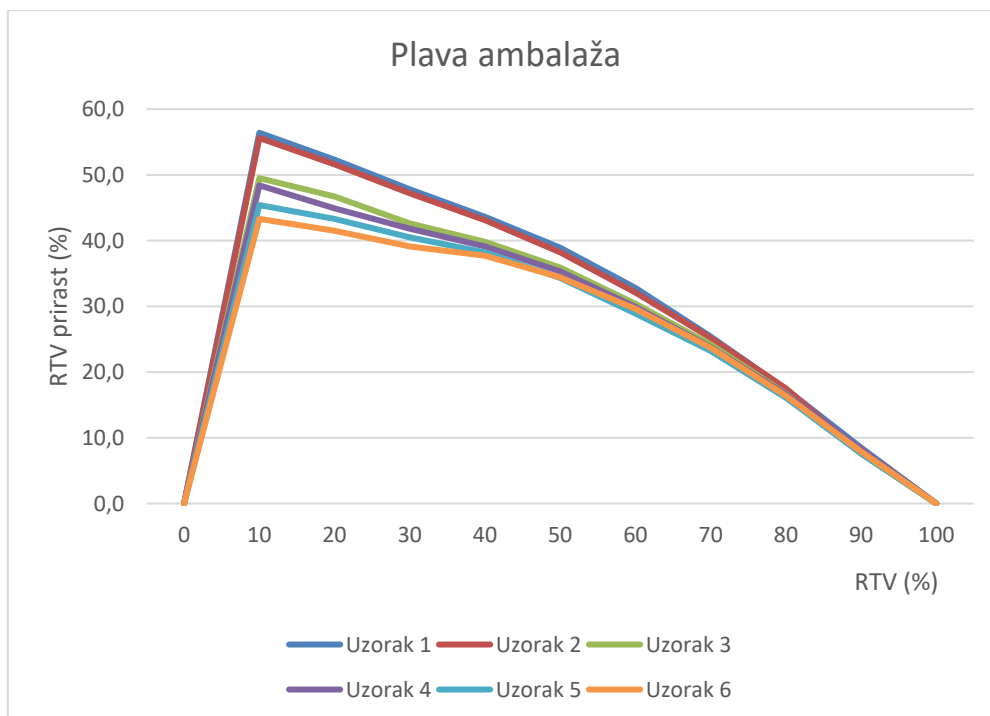
Slika 42. Kontrolni strip za definiranje prirasta rastertonske vrijednosti i deformacije rasterskog elementa



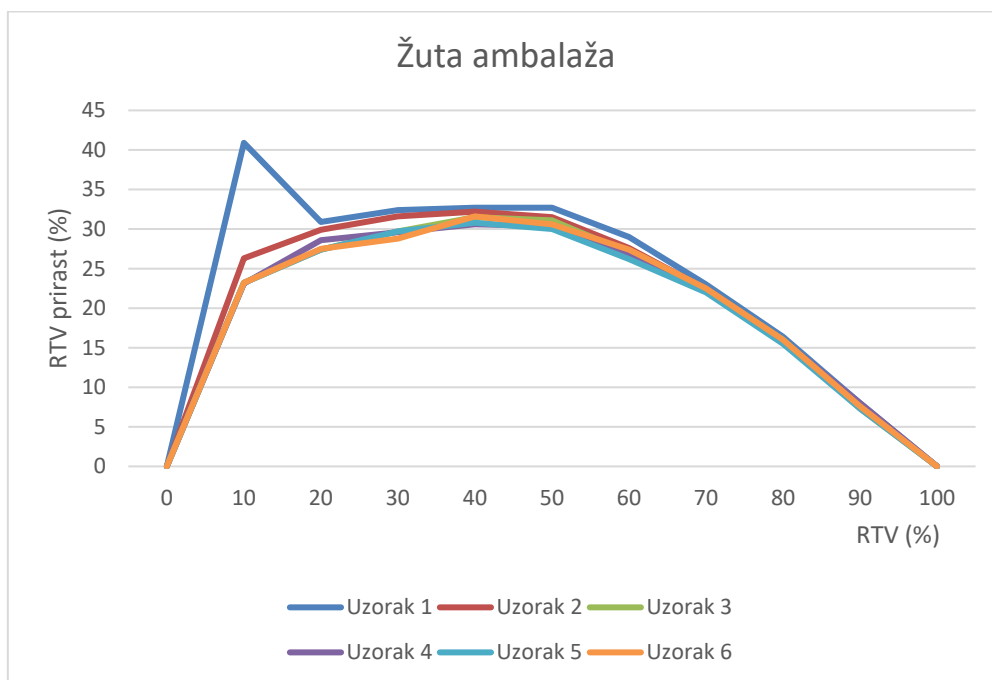
Slika 43. Prirast rastertonske vrijednosti kod različitih nanosta klizne bijele boje na bijeloj ambalaži



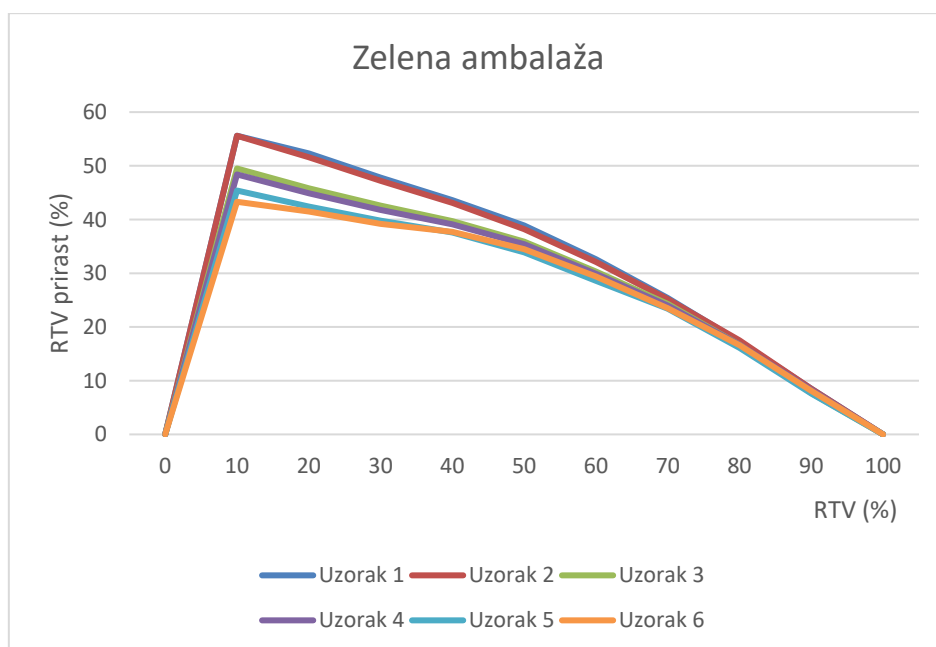
Slika 44. Prirast rastertonske vrijednosti kod različitih nanosta klizne bijele boje na crvenoj ambalaži



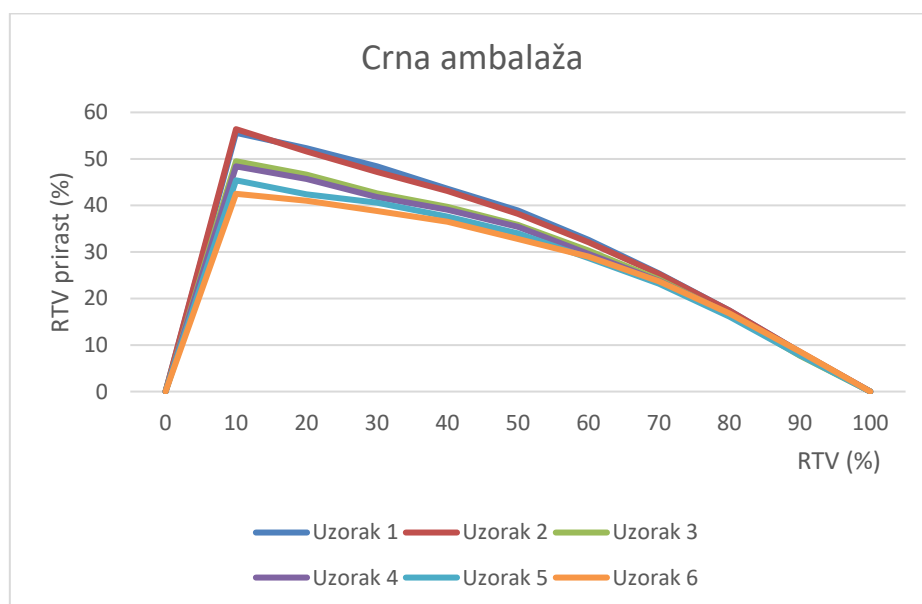
Slika 45. Prirast rastertonske vrijednosti kod različitih nanosta klizne bijele boje na plavoj ambalaži



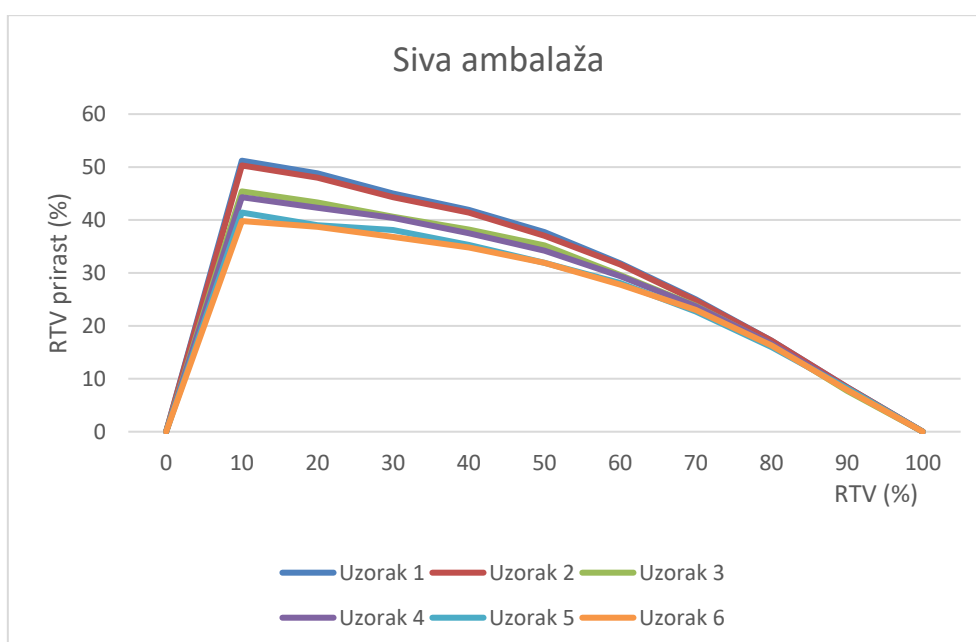
Slika 46. Prirast rastertonske vrijednosti kod različitih nanosta klizne bijele boje na žutoj ambalaži



Slika 47. Prirast rastertonske vrijednosti kod različitih nanosta klizne bijele boje na zelenoj ambalaži



Slika 48. Prirast rastertonske vrijednosti kod različitih nanosta klizne bijele boje na crnoj ambalaži



Slika 49. Prirast rastertonske vrijednosti kod različitih nanosta klizne bijele boje na sivoj ambalaži

3.2.3. Definiranje gamuta reprodukcije

Kako bi distribucija vizualne transformacije bila što kvalitetnija, ona je ovisna o različitim medijima koji su ograničeni informacijama koje prenose, a odnose se uglavnom na informacije o transformaciji trisimulskih vrijednosti neke boje. Ograničeni skup informacija koji posjeduju uređaji (skeneri, računala, CTP uređaji, grafički strojevi...) odnosno koji se odnose na određeni medij naziva se gamut reprodukcije. Kroz jedan reproduksijski sustav može se definirati raspon tonaliteta u CIE prostoru boja za gamut.

Transformacija informacija kroz specifičan uređaj ili medij informacija o boji mijenja se prema određenim zakonitostima, a rezultat je smanjen raspon tonaliteta reprodukcije originala. Vizualni doživljaj koji oko registrira oko sebe u prirodi stimuliran je najvećim rasponom tonaliteta.

Gamut se izračunava metodom *Neugebauerov model rastriranja*, kojom se ujednačava doživljaj između gamuta reprodukcije i gamuta originala.

Neugebauerov model rastriranja se prikazuje [63]:

$$\begin{aligned} c(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = & (1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)(1 - \alpha_3)g_p + (\alpha_1)(1 - \alpha_2)(1 - \alpha_3)g_{p1} \\ & + (1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)(1 - \alpha_3)g_{p2} + (\alpha_1)(1 - \alpha_2)(1 - \alpha_3)g_{p12} \\ & + (1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)(1 - \alpha_3)g_{p3} + (\alpha_1)(1 - \alpha_2)(1 - \alpha_3)g_{p13} \\ & + (1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)(1 - \alpha_3)g_{p23} + (\alpha_1)(1 - \alpha_2)(1 - \alpha_3)g_{p123} \end{aligned} \quad (1)$$

gdje c površina obojana sa tri bojila kao funkcija tri površinske vrijednosti pokrivenosti α_1 , α_2 i α_3 . Boju tiskovne podloge predstavlja g_p , prvo bojilo tiskano na tiskovnoj podlozi predstavlja g_{p1} , prvo i drugo bojilo tiskano na tiskovnoj podlozi predstavlja g_{p12} , prvo, drugo i treće bojilo tiskano na tiskovnoj podlozi predstavlja g_{p123} .

Za n boja postoje $2n$ tiskarskih primara. Dio tiskarske površine bojila označimo s α_1 , i integralne vrijednosti obojenja označimo kao $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ tada se Neugebauerov model za n bojila može izračunati kao zbroj svih tiskovnih vrijednosti q [4].

$$c(\alpha) = \sum_{q=1}^{2^n} \left[\prod_{i=1}^n f(q, i, \alpha) \right] \cdot g_q$$

gdje je $f(q, i, \alpha) = \begin{cases} \alpha \longrightarrow & \text{kada je } q \text{ zajedno s boju } i \\ 1 - \alpha \longrightarrow & \text{kada } q \text{ nije zajedno s bojom } i \end{cases}$ (2)

Kada prikazani model stavimo u odnos s Ω CIE opsegom numeričkih vrijednosti u određenom selektivnom području CIE prostora boja tada je Ω_{otiska} opseg numeričkih kontroliranih vrijednosti boje određenog medija [64].

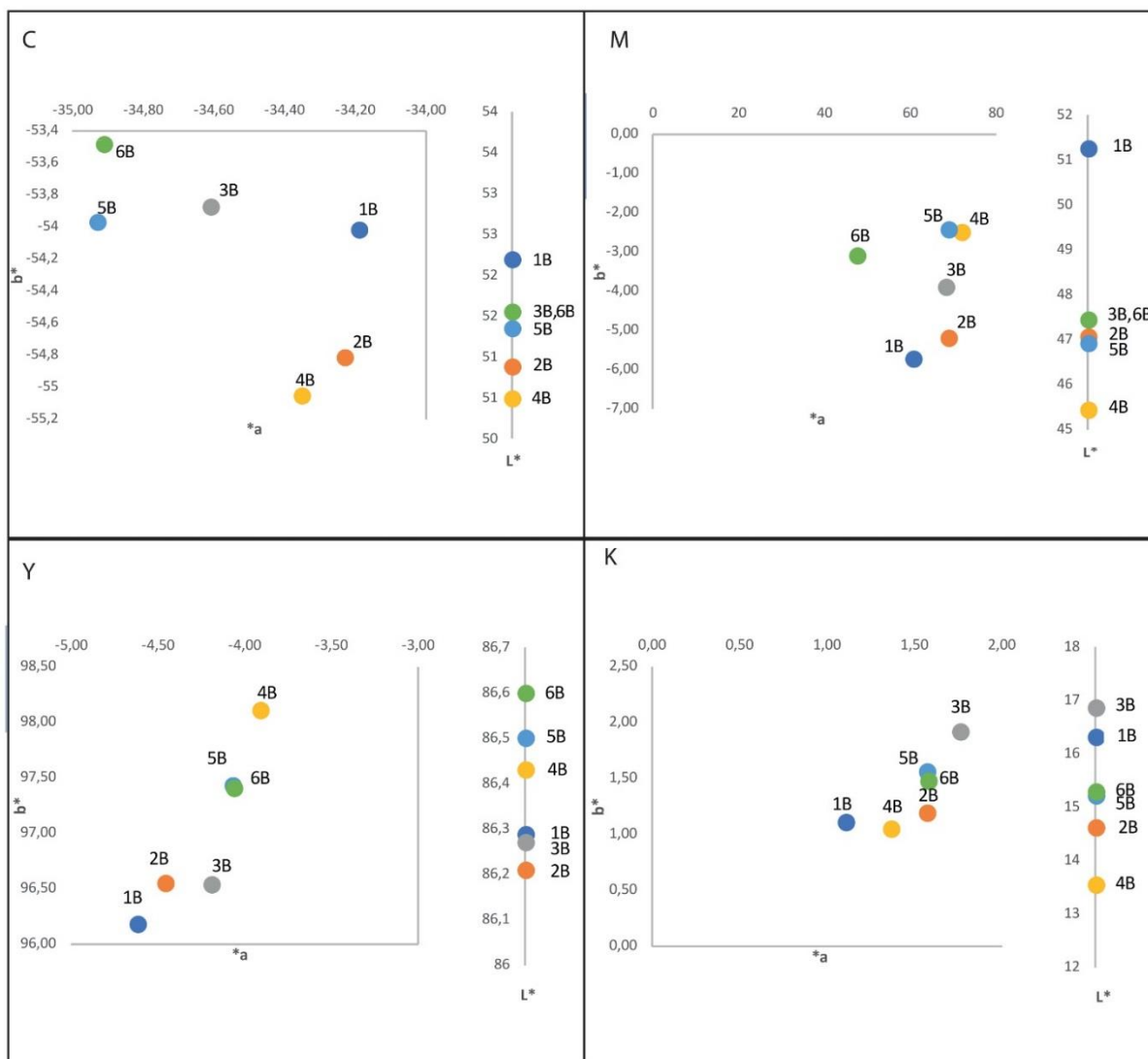
$$G = \left\{ t \in \Omega_{CIE} \left(\exists c \in \Omega_{odajna\ otiska} \text{ za koje vrijedi } F_{uredaja}(c) = t \right) \right\} \quad (3)$$

Gamut medija određuje se jednadžbom 3, gdje $F_{uredaja}$ predstavlja funkciju koja obavlja transformaciju iz zavisnog prostora boja medija u CIE prostor boja. Oznaka t predstavlja informaciju o boji u CIE prostoru, a oznaka c njezinu transferiranu vrijednost u zavisnom prostoru boja medija.

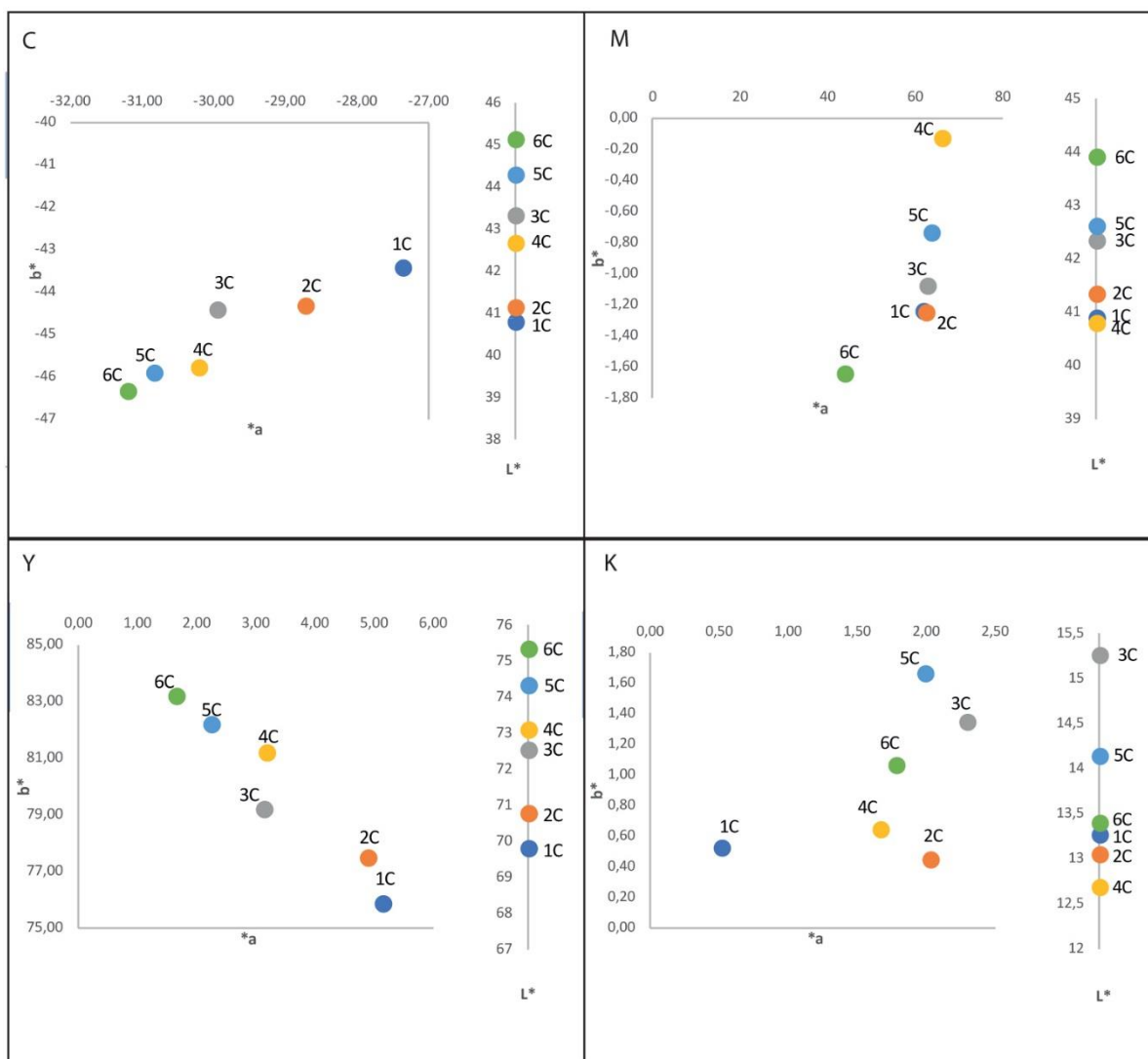
Gamut se dobiva preko trisimulosnih vrijednosti raspona tonaliteta CIE L*a*b* sustava i prikazan je kroz slijedeće grafove za svaku otisnutu boju Cijan, Magentu, Žutu i Crnu (CMYK).

Talica 11. Legenda kartica izmjerenih vrijednosti prikazanih grafovima

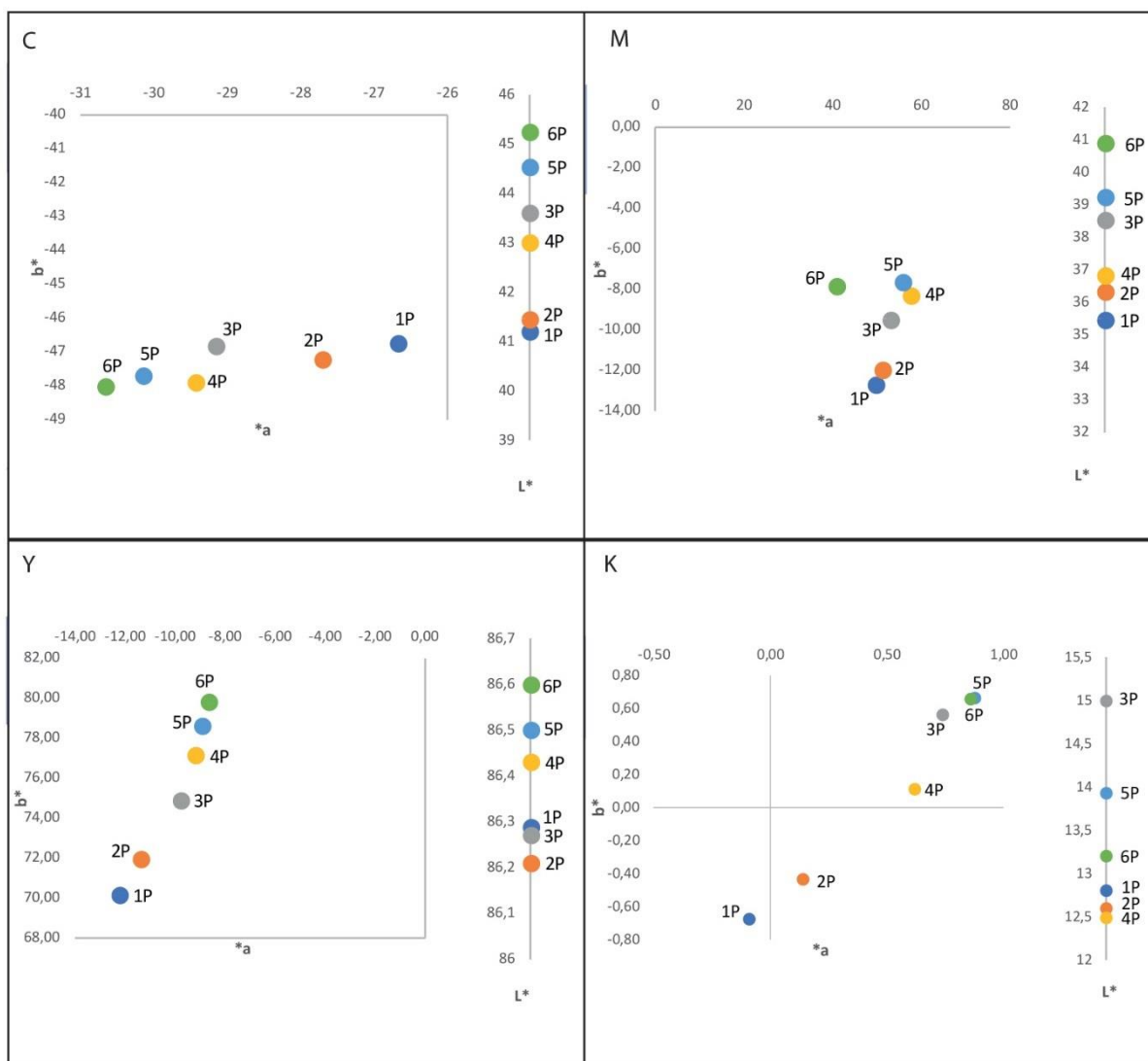
Uzorak/ Boja podloge bijela	Uzorak/ Boja podloge crvena	Uzorak/ Boja podloge plava	Uzorak/ Boja podloge žuta	Uzorak/ Boja podloge zelena	Uzorak/ Boja podloge crna/ kotur	Uzorak/ Boja podloge siva	Nanos klizne bijeke boje (g/m ²)	Debljina materijala (μm)	Boja materijala
1B	1C	1P	1Ž	1Z	1K	1S	3	45	Trans.
2B	2C	2P	2Ž	2Z	2K	2S	5	45	Trans.
3B	3C	3P	3Ž	3Z	3K	3S	6	45	Trans.
4B	4C	4P	4Ž	4Z	4K	4S	7	45	Trans.
5B	5C	5P	5Ž	5Z	5K	5S	8	45	Trans.
6B	6C	6P	6Ž	6Z	6K	6S	9	45	Trans.



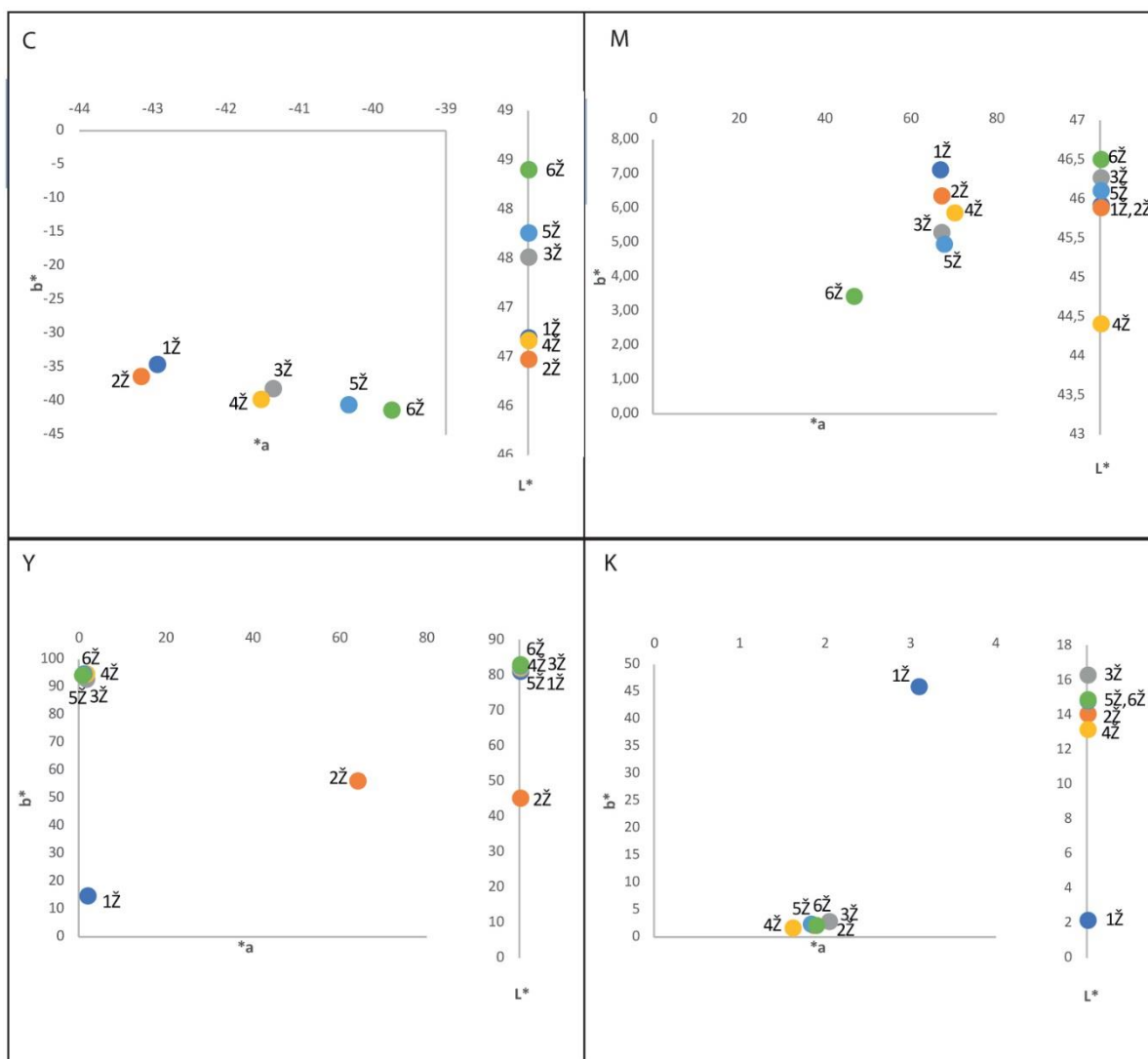
Slika 50. Prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz CIE L*a*b* sustav za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na bijeloj ambalaži



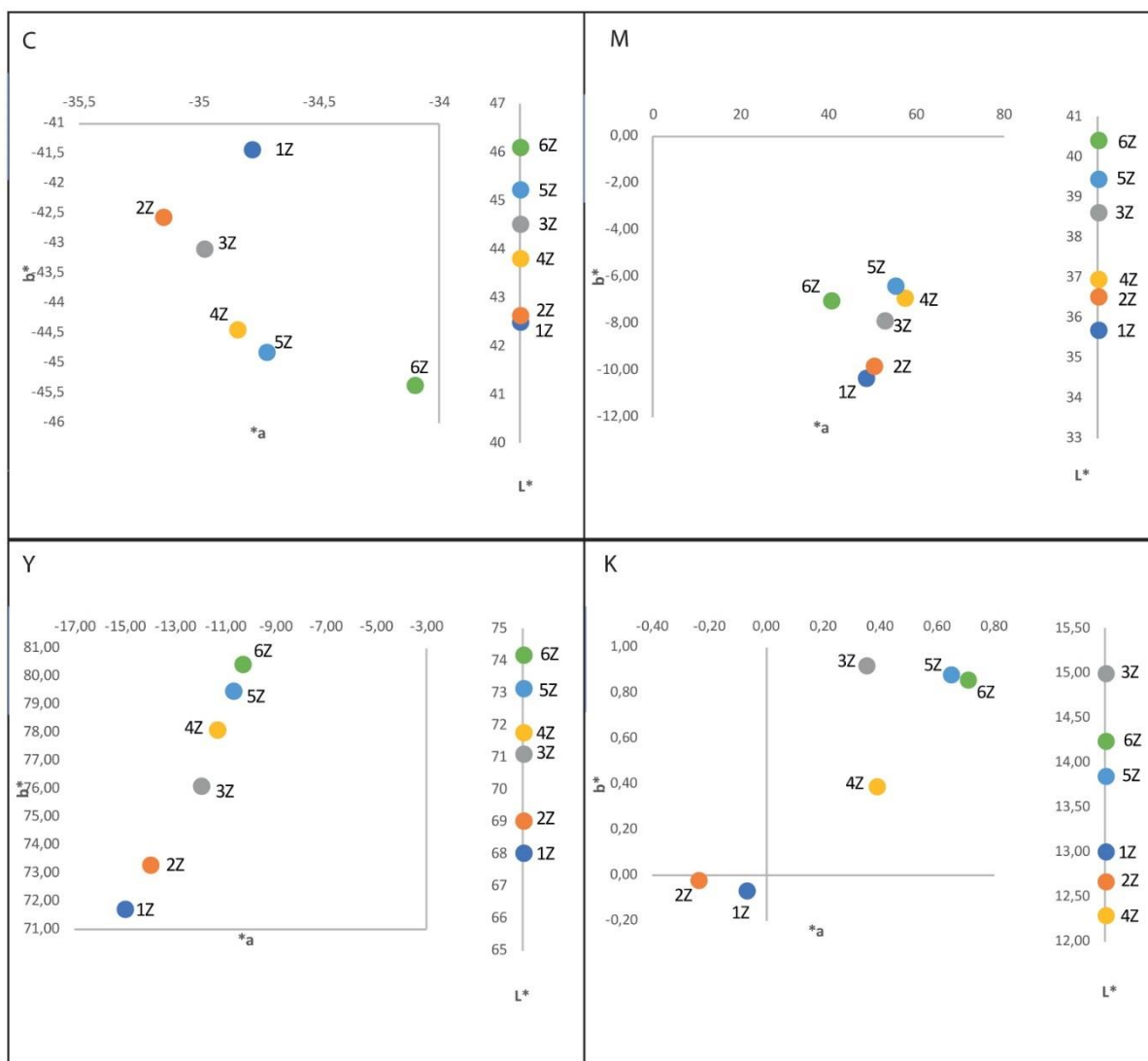
Slika 51. Prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz L*a*b* sustav za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na crvenoj ambalaži



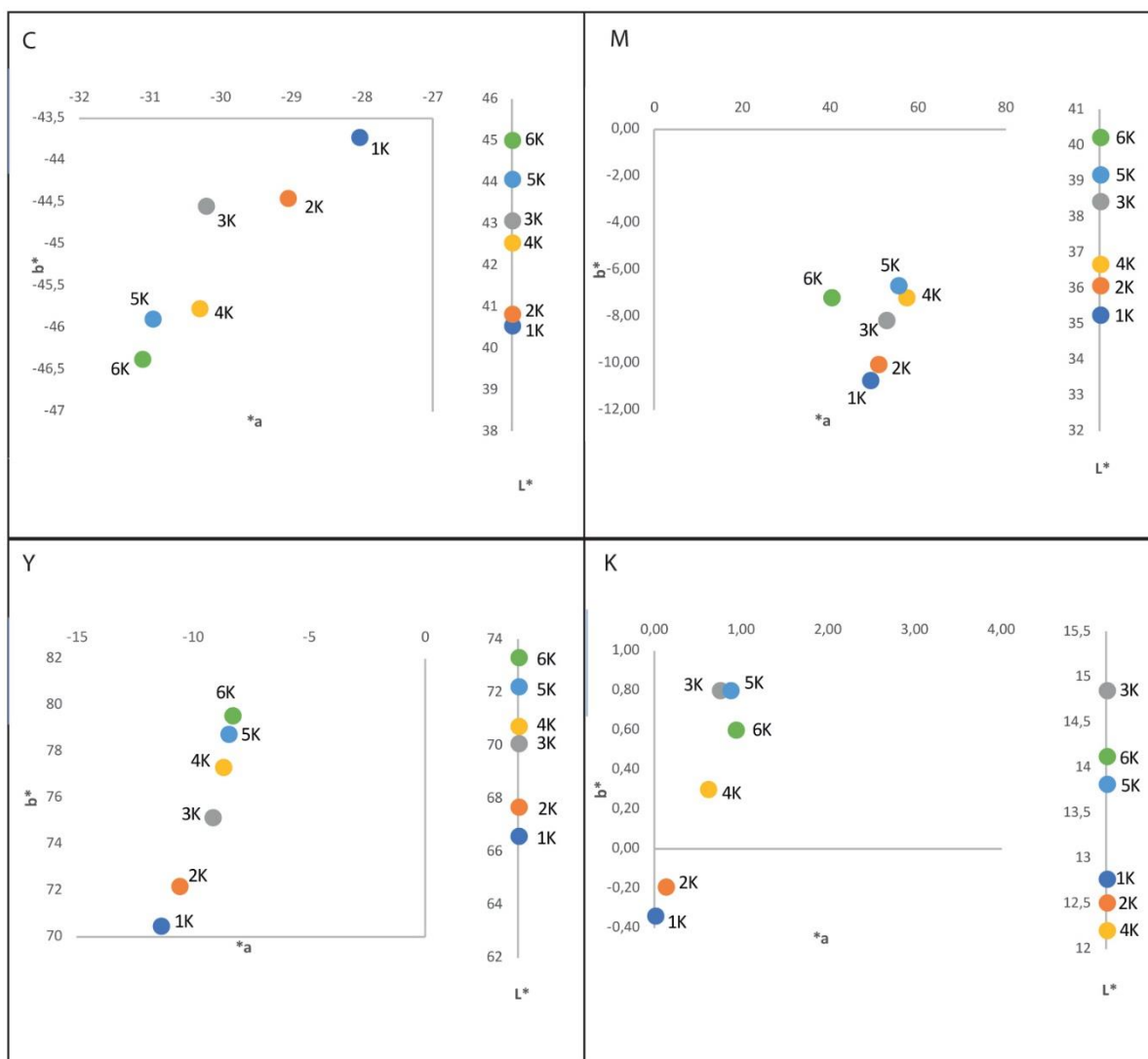
Slika 52. Prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz L*a*b* sustav za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na plavoj ambalaži



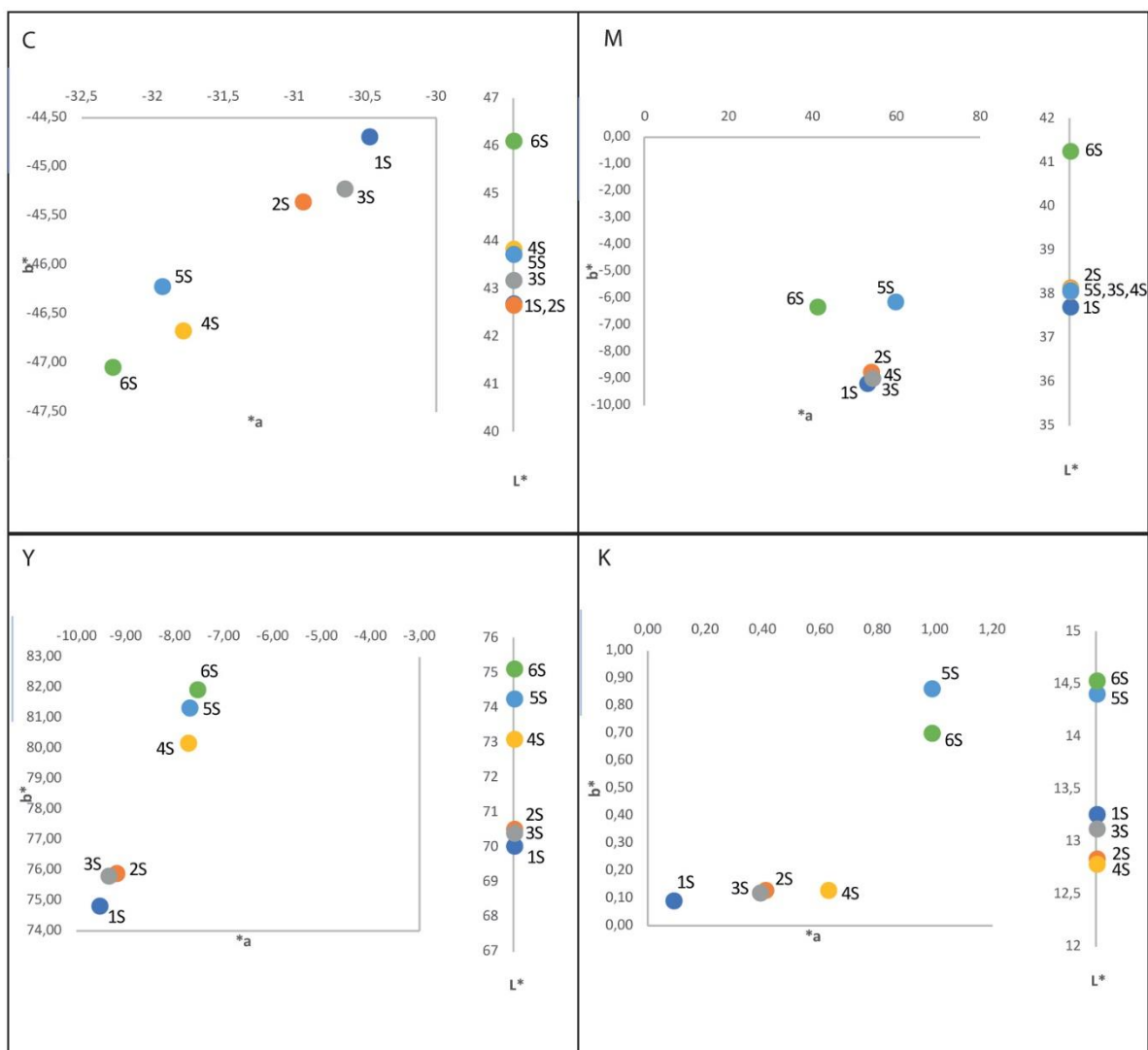
Slika 53. Prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz $L^*a^*b^*$ sustav za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na žutoj ambalaži



Slika 54. Prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz CIE L*a*b* sustav za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na zelenoj ambalaži



Slika 55. Prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz CIE L*a*b* sustav za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na crnoj ambalaži



Slika 56. Prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz CIE L*a*b* sustav za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na sivoj ambalaži

3.2.4. Opacitet

Kod tiska na polimernim materijalima vrlo često se koristi bijela boja čija je uloga da djelomično služi kao barijera od sastojaka pakiranja i omogućava neproziran kontrast za sami dizajn kolora odnosno otisak. Opacitet ili neprozirnost boje definira se kao sposobnost premaza da spriječi transmisiju svjetlosti. Što je veći opacitet boje, to je učinkovitije prekrivanje tiskovne podloge.

Standardno se otiskuju četiri procesne boje cijan, magenta, žuta i crna čiji nositelji obojenja mogu biti pigmenti i tekuća bojila. Koloranti su sitno disperzirane čestice u vezivu i u otapalu. Što su čestice pigmenata manje to je disperzija veća. Da bi boja imala veći opacitet, odnosno da bi se smanjila njena prozirnost dodaje se veća koncentracija pigmenata. Bojila koja ponekad služe kao zamjena skupim pigmentima će zbog svoje male molekularne mase imati manju pokrivnu moć što obavezno zahtijeva veći nanos boje. Da bi se izbjegao deblji sloj procesnih bojila a smanjila transparentnost istih tiska se podložna bijela boja. U ovom istraživanju opacitet se mjerio na šest različitih nanosa bijele boje (tablica 12.) koja osim za smanjenje prozirnosti ukupnog dizajna ujedno služi za kliznost materijala kod termoskupljajućih etiketa pri navlačenju rukavca na krutu ambalažu.

Tablica 12. Definiranje šest različitih debljina nanosa bijele klizne boje na polimernom materijalu

PVC materijal	Nanos bijele boje
Uzorak 1	3 g/m ²
Uzorak 2	5 g/m ²
Uzorak 3	6 g/m ²
Uzorak 4	7 g/m ²
Uzorak 5	8 g/m ²
Uzorak 6	9 g/m ²

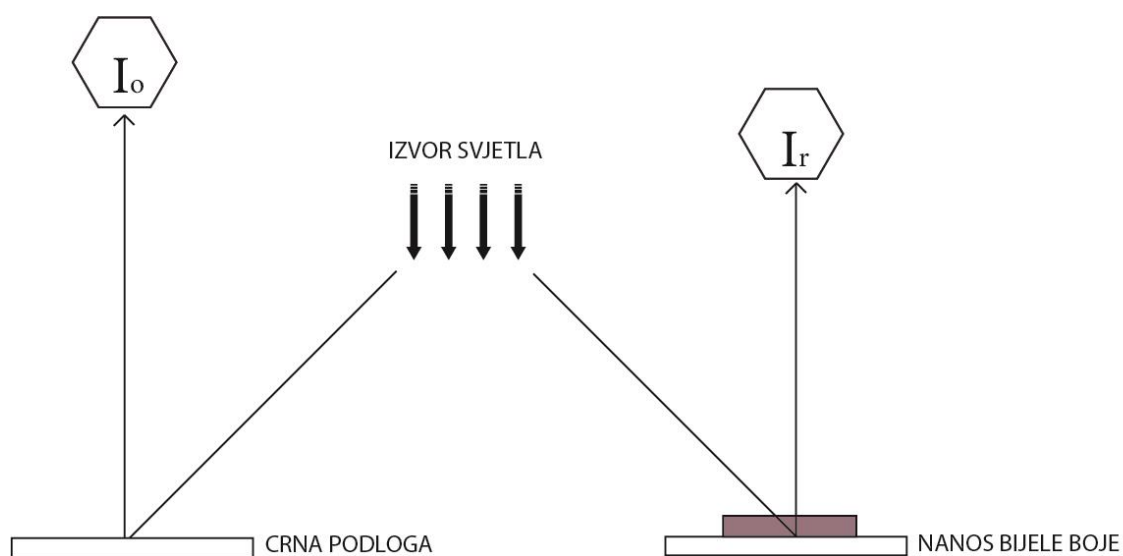
Uređaj kojim se kontrolira opacitet boje je spektrofotometar. Spektrofotometrom se mjeri reflektirana svjetlost sa podloge I_o i sa podloge nanosa boje I_r . Opacitet se računa prema sljedećoj formuli:

$$R = \frac{I_r}{I_o}$$

gdje je R – refleksija, I_o – intenzitet upadnog svjetla, I_r – intenzitet reflektiranog svjetla

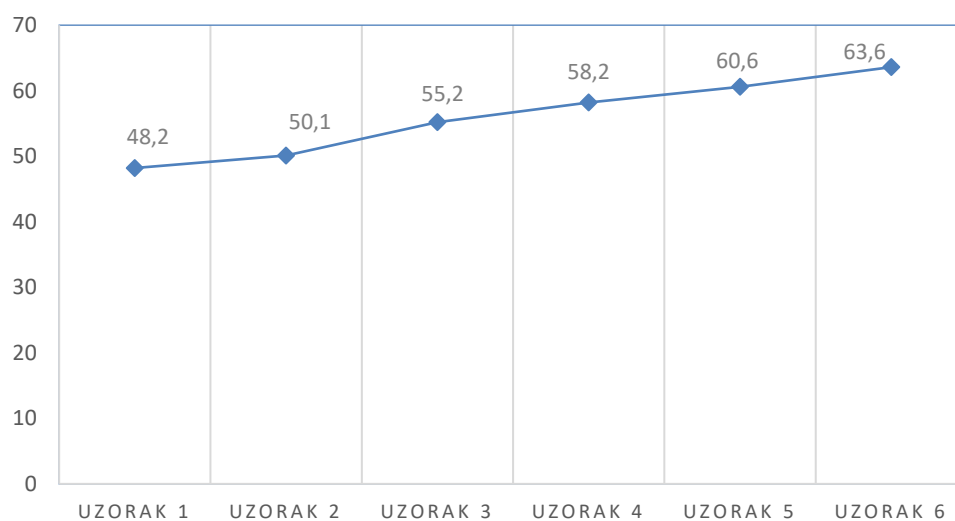
$$O = \frac{1}{R}$$

gdje je O – opacitet, R – refleksija



Slika 57. Prikaz načina mjerenja opaciteta sa Spektrofotometrom

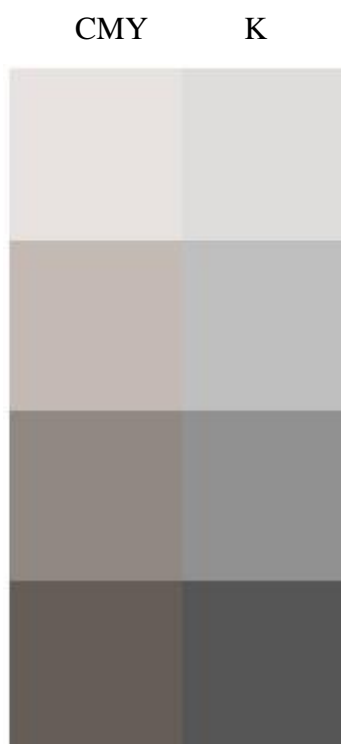
Za mjerenje opaciteta bijele boje često se mjeri svjetlina, odnosno L^* vrijednost [65].



Slika 58. Graf prikazuje vrijednosti opaciteta za šest različitih debljina nanosa bijele boje

3.2.5. Definiranje optimalnog sivog balansa

Nestabilnost različitih parametara i uvijeta za vrijeme tiska koji djeluju na kvalitetu tiska uzrokuje i dotok bojila na tiskovnu podlogu koji može biti neujednačen. Utjecaj imaju adhezione i kohezione sile unutar samog bojila ali i između tiskovne podloge i bojila. Višebojnim tiskom može se kvalitetno reproducirati kromatične boje te boje koje se nalaze vrlo blizu osi svjetline CIE $L^*a^*b^*$ sustava. U situaciji kada dizajn na reprodukciji sadrži većinu kromatičnih boja, kvaliteta tiska se može pratiti mjerenjem gustoće obojenja punog polja. Ali ako dizajn reprodukcije ima veliki udio tiskovne površine u malim kromatskim vrijednostima kontrola tiska može se obavljati mjerenjem polja koja na sebi imaju točne RTV vrijednosti dobivene C, M, i Y boja. Prilikom optimalnog obojenja i uvijeta u procesu tiska u navedenim RTV poljima dobiva se osjećaj sivog tona. Polja se mogu kontrolirati vizualno ili spektrofotometrijski. Opisana polja koja su kontrolni strip ili se nalaze unutar njega nazivaju se polja za definiranje optimalnog sivog balansa. Optimalni sivi balans prikazuje međusobnu ravnotežu između triju (C, M i Y) bojila [4]. Kontrolni strip za mjerenje optimalnog sivog balansa izražen je od para polja, gdje je jedno polje sastavljeno od cijan, magenta i žutog bojila s definiranim rastertonskim vrijednostima te drugog rastriranog polja s crnim bojilom (slika 59.).

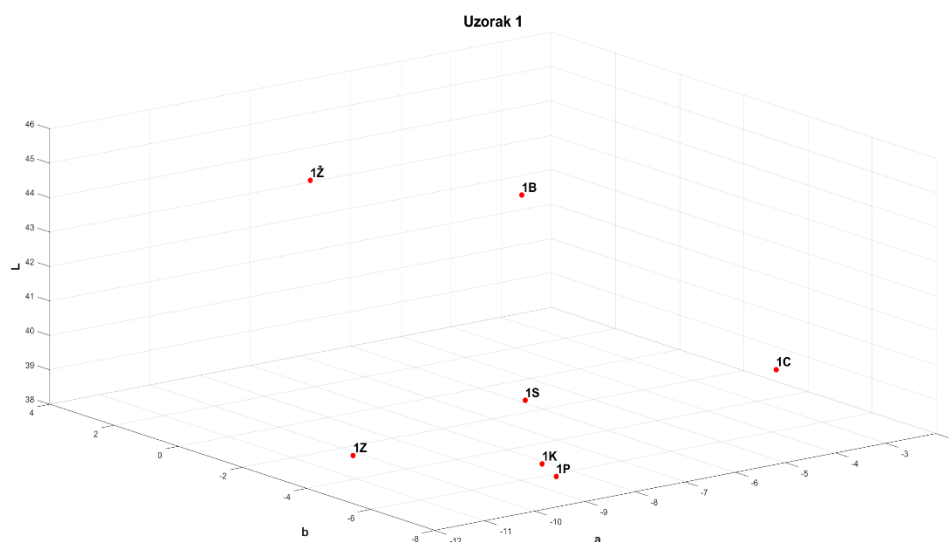


Slika 59. Kontrolni strip za određivanje optimalnog sivog balansa

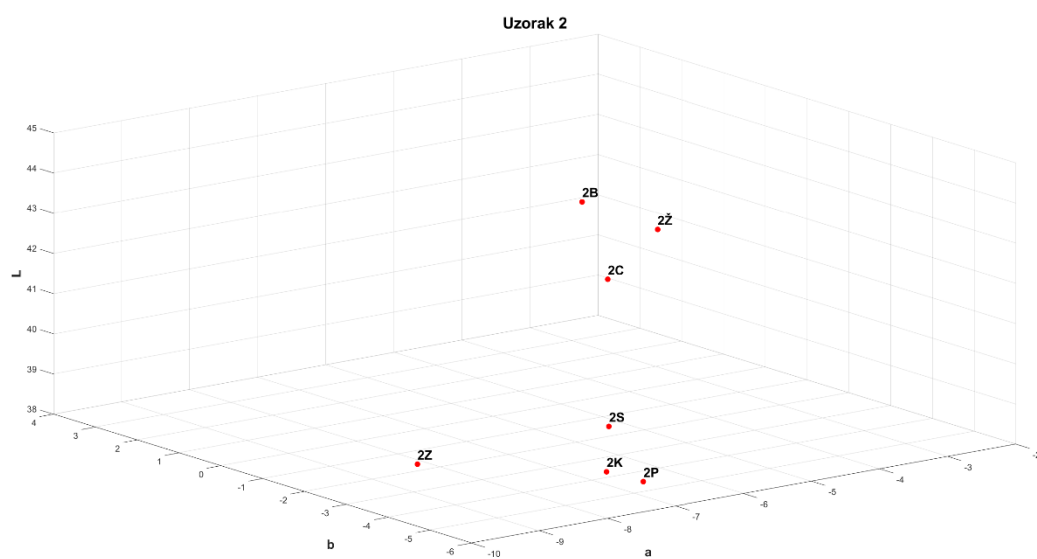
Kolorimetrijskim vrijednostima (CIE $L^*a^*b^*$) dobivenim spektrofotometrijskim mjerenjem opisuje se obojenje koje doživljava prosječno ljudsko oko. Kolorimetrijskim vrijednostima svjetlina se izražava s veličinom L^* , a pomoću vrijednosti a^* i b^* ton boje. Spektrofotometrijskim vrijednostima uključuje se ljudska percepcija, distribucija spektralne energije izvora svjetlosti, spektralna refleksija od objekta i spektralni zapis s obzirom na standardnog promatrača [66]. Optimalni sivi balans određuje se Euclidean razlikom ili kolorimetrijskom razlikom boje (ΔE) [67] između polja koje je sastavljeno od cijan, magenta i žute boje (b) te polje s crnom bojom (s).

Tablica 13. Rastertonske vrijednosti (%) polja na kontrolnom stripu

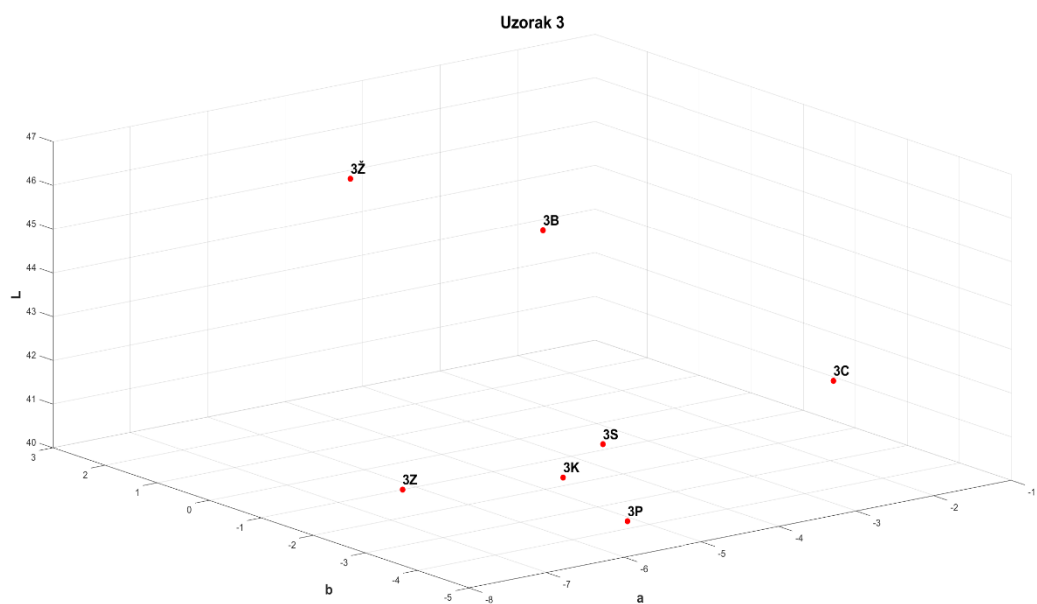
	A	B	C	D
Uzorci 1 do 6				
K	15%	30%	55%	80%
C,M,Y	10%, 7%, 7%	25%, 20%, 20%	50%, 40%, 40%	75%, 65%, 65%



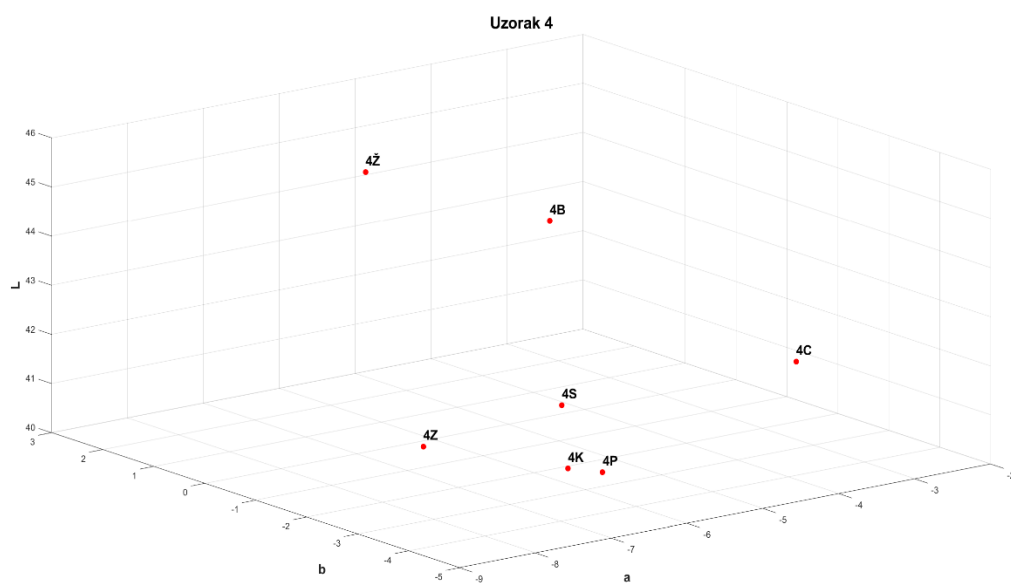
Slika 60. Kolorimetrijske razlike boja za polje CMY između različitih boja podloge ambalaže za Uzorak 1.



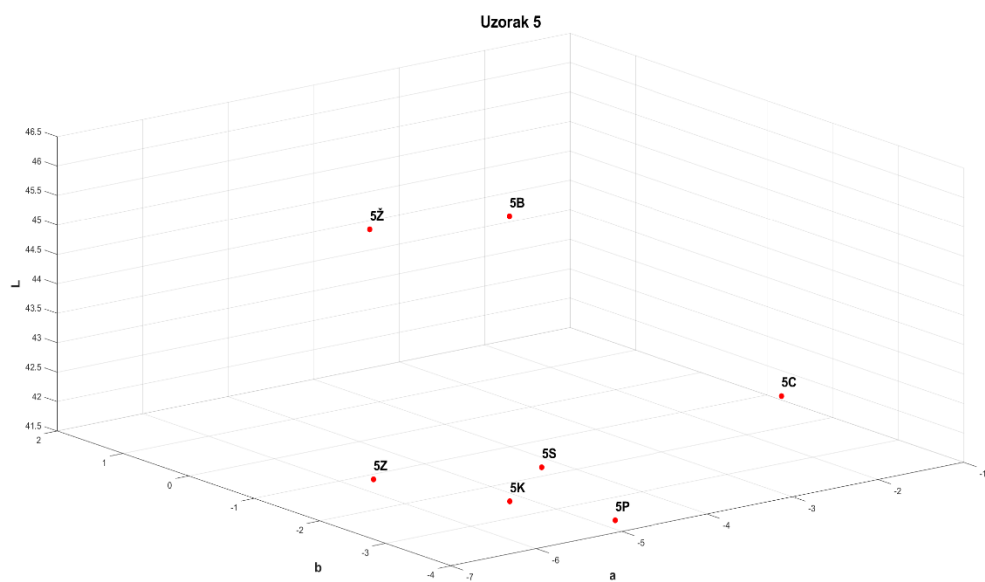
Slika 61. Kolorimetrijske razlike boja za polje CMY između različitih boja podloge ambalaže za Uzorak 2.



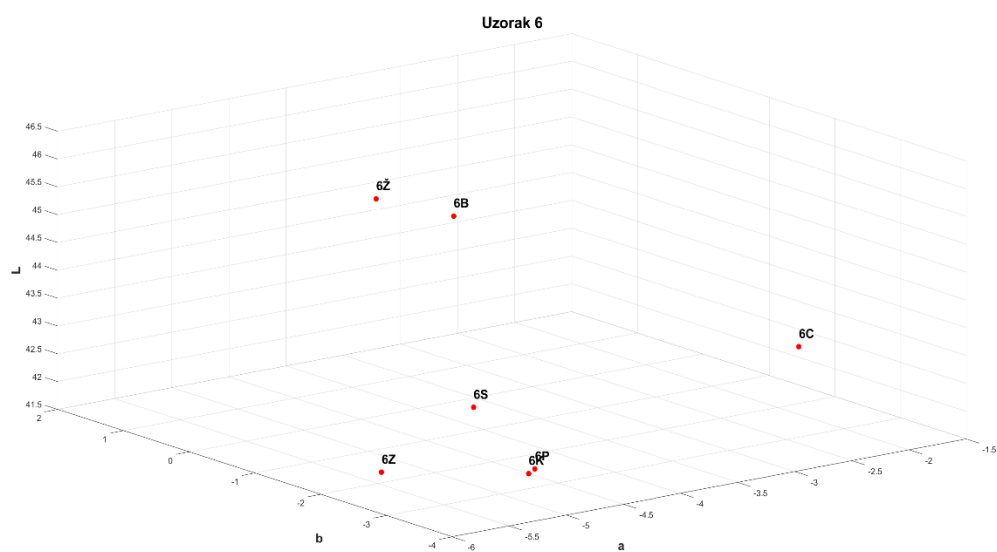
Slika 62. Kolorimetrijske razlike boja za polje CMY između različitih boja podloge ambalaže za Uzorak 3.



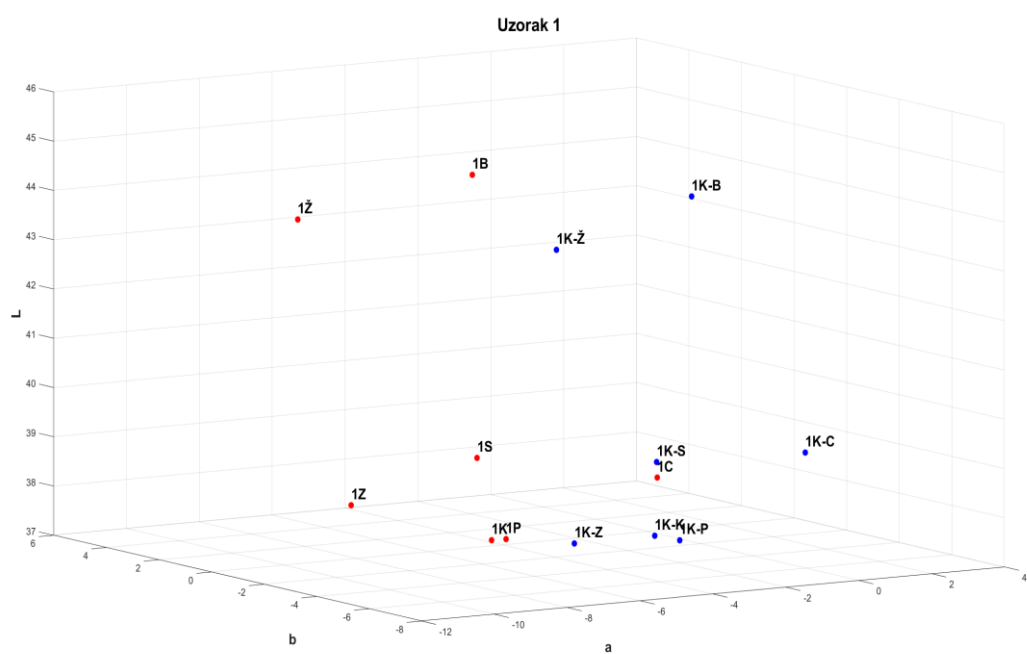
Slika 63. Kolorimetrijske razlike boja za polje CMY između različitih boja podloge ambalaže za Uzorak 4.



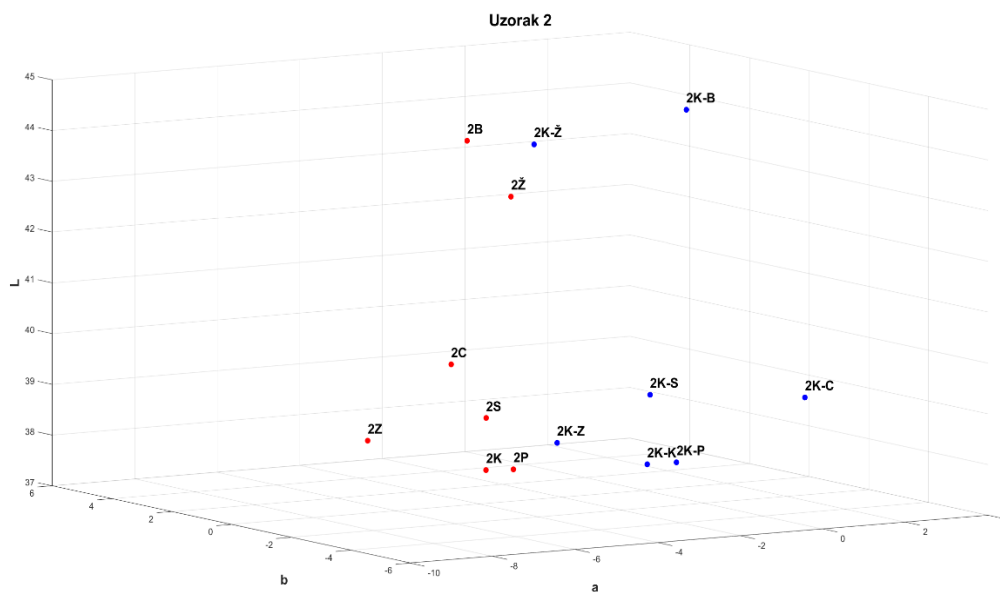
Slika 64. Kolorimetrijske razlike boja za polje CMY između različitih boja podloge ambalaže za Uzorak 5.



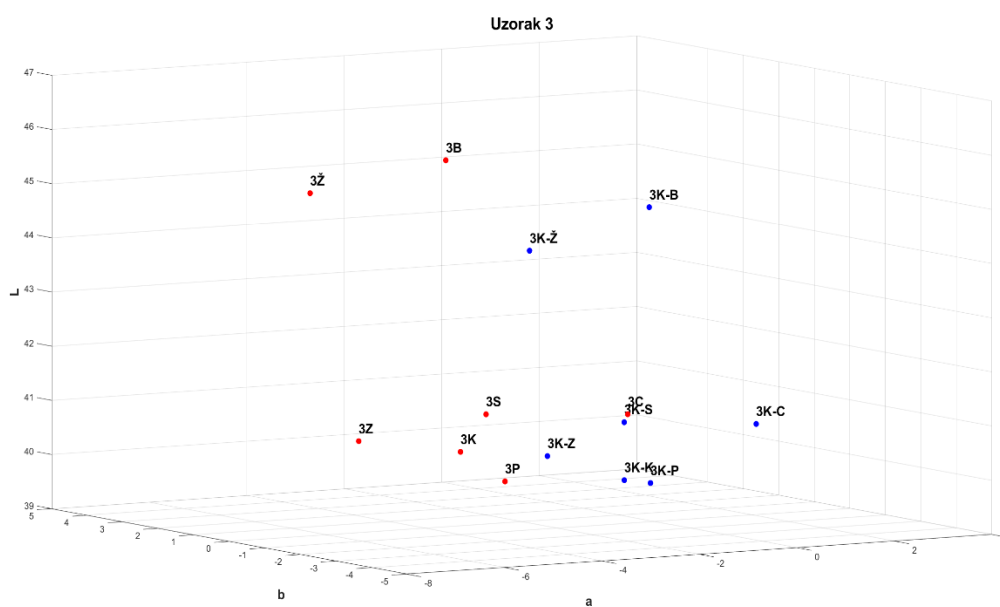
Slika 65. Kolorimetrijske razlike boja za polje CMY između različitih boja podloge ambalaže za Uzorak 6.



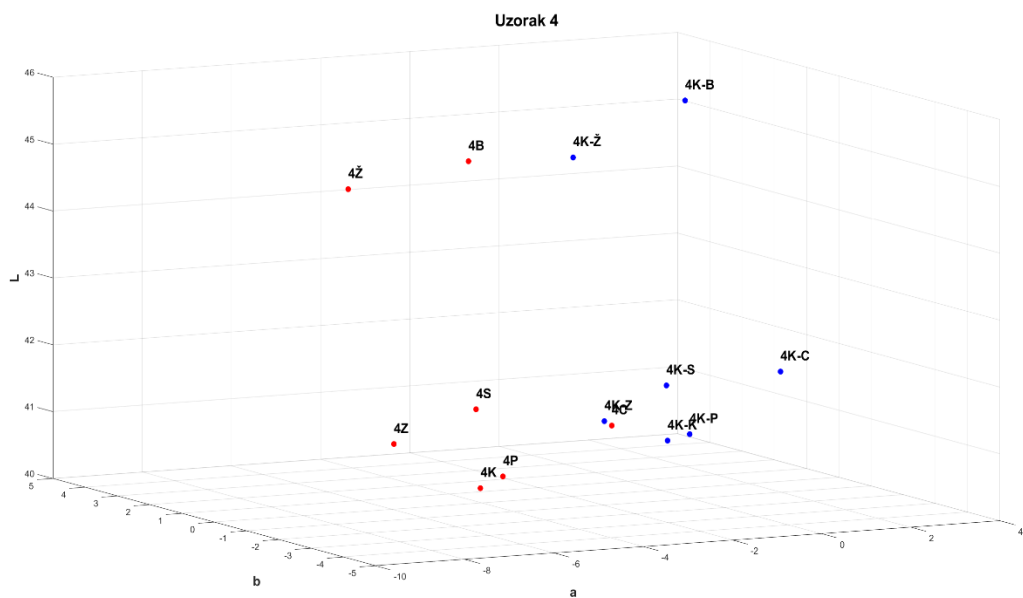
Slika 66. Usporedba kolorimetrijskih razlika boja između polja CMY i K za Uzorak 1.



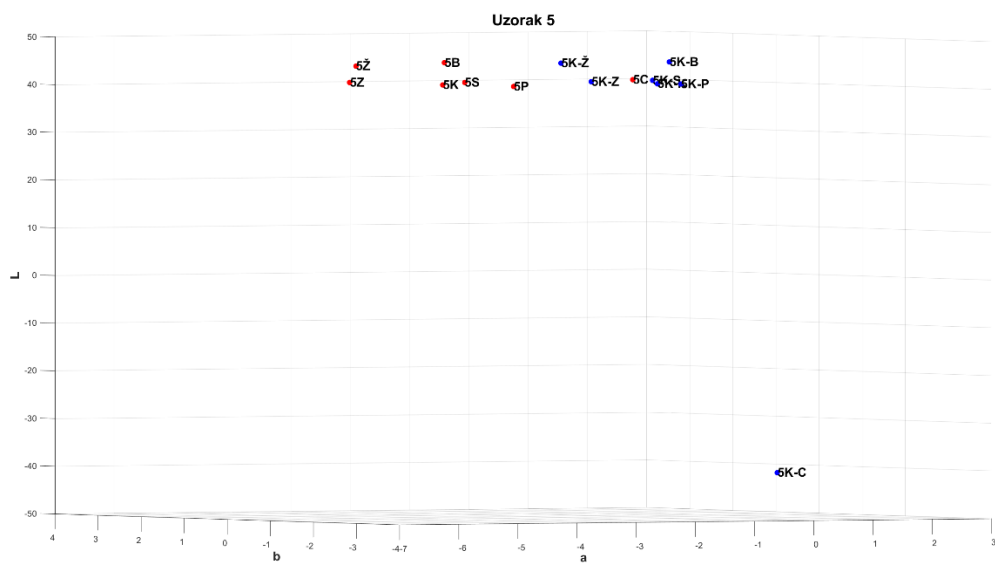
Slika 67. Usporedba kolorimetrijskih razlika boja između polja CMY i K za Uzorak 2.



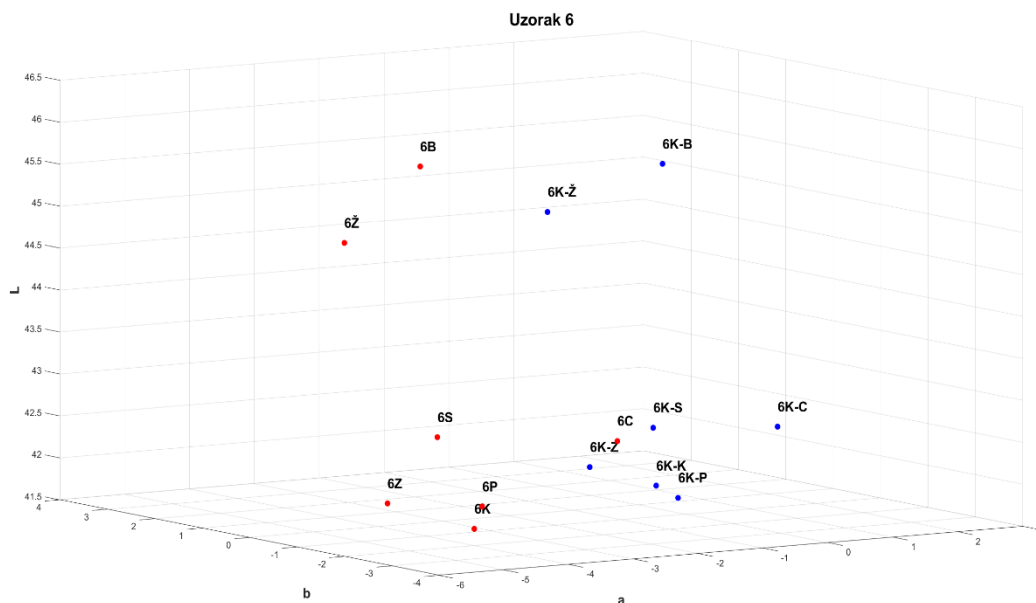
Slika 68. Usporedba kolorimetrijskih razlika boja između polja CMY i K za Uzorak 3.



Slika 69. Usporedba kolorimetrijskih razlika boja između polja CMY i K za Uzorak 4.



Slika 70. Usporedba kolorimetrijskih razlika boja između polja CMY i K za Uzorak 5.

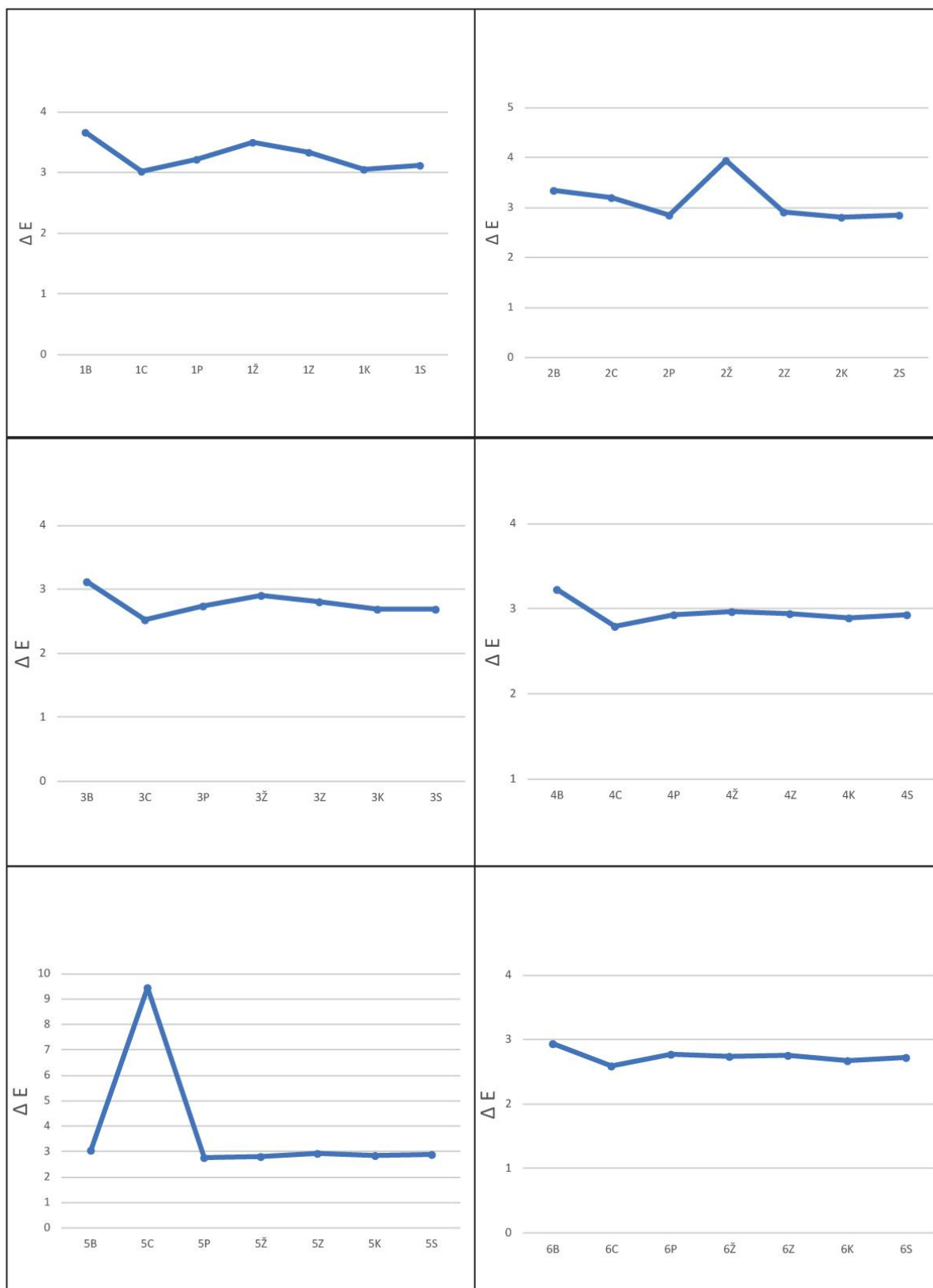


Slika 71. Usporedba kolorimetrijskih razlika boja između polja CMY i K za Uzorak 6.

Nakon izmjerenih Lab vrijednosti između zadanih polja CMY i K računao se ΔE koji prikazuje optimalan sivi balans. Dobivene vrijednosti prikazane su (tablicom 14.).

Tablica 14. Prikazuje kolorimetrijske razlike ΔE za polja CMY i K kod uzoraka od 1 do 6.

ΔE (CMY, K) Za uzorke 1-6	Bijela podloga	Crvena podloga	Plava podloga	Žuta podloga	Zelena podloga	Crna podloga	Siva podloga
1	3,65	3,02	3,21	3,49	3,34	3,04	3,11
2	3,33	3,19	2,84	3,94	2,91	2,80	2,84
3	3,12	2,53	2,74	2,90	2,81	2,68	2,69
4	3,22	2,80	2,93	2,97	2,94	2,89	2,93
5	3,06	9,46	2,75	2,78	2,91	2,84	2,87
6	2,94	2,59	2,76	2,74	2,76	2,66	2,72



Slika 72. Grafički prikaz ΔE za polja CMY i K iz (tablice 14.).

3.2.6. Subjektivna metoda istraživanja

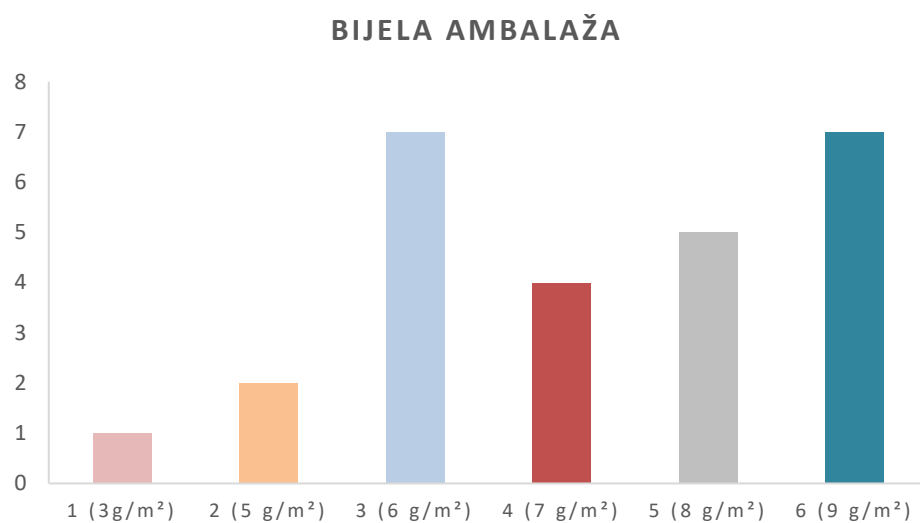
Subjektivna metoda istraživanja definirala se preko ukupne kvalitete višebojne reprodukcije. Ispitivanje ukupne kvalitete reprodukcije obavljeno je na osnovi uzoraka koji su odabrani iz svake naklade i stavljeni su prema nanosu klizne bijele boje koja je promjenjiva, na različite boje podloga ambalaže. Ispitivanje je vršeno u realnim uvjetima u trgovini na policama gdje stoje proizvodi istih performansi u realnom vremenu.

Vizualna analiza je rađena na osnovu 30 ispitanika, dobne granice od 30 do 50 godina. Ukupna kvaliteta reprodukcije je definirana na osnovu kriterija: prikaz boja, prikaz svijetlih tonova, prikaz tamnih tonova, kvaliteta tonova (ravnomjeran prijelaz boje), kvaliteta i oštrote linije.

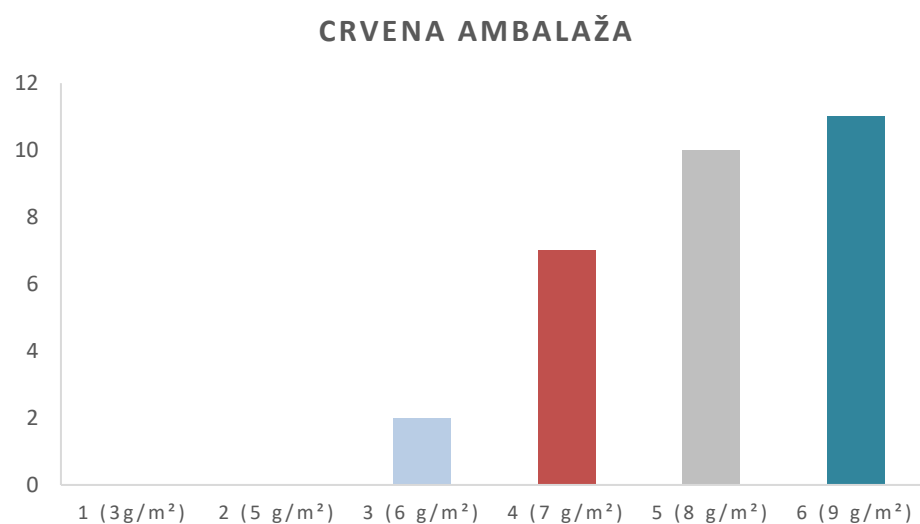
Rezultati ispitivanja ukupne kvalitete reprodukcije prikazani su na (slikama 73-79.). Ispitivani uzorci vrednovani su na osnovu (tablice 15.).

Tablica 15. Način vrednovanja ukupne vizualne kvalitete reprodukcije

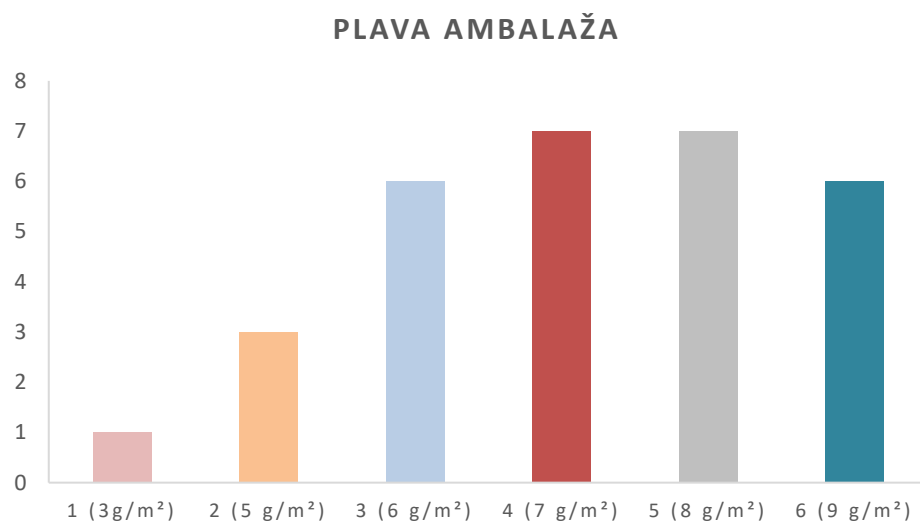
Uzorci	Vizualna analiza na 30 ispitanika	Opis vrednovanja uzoraka reprodukcije
1 (3g/m ²)		Najbolja kvaliteta reprodukcije
2 (5g/m ²)		Bolja kvaliteta reprodukcije
3 (6g/m ²)		Dobra kvaliteta reprodukcije
4 (7g/m ²)		Loša kvaliteta reprodukcije
5 (8g/m ²)		Najlošija kvaliteta reprodukcije
6 (9g/m ²)		Nije odabran



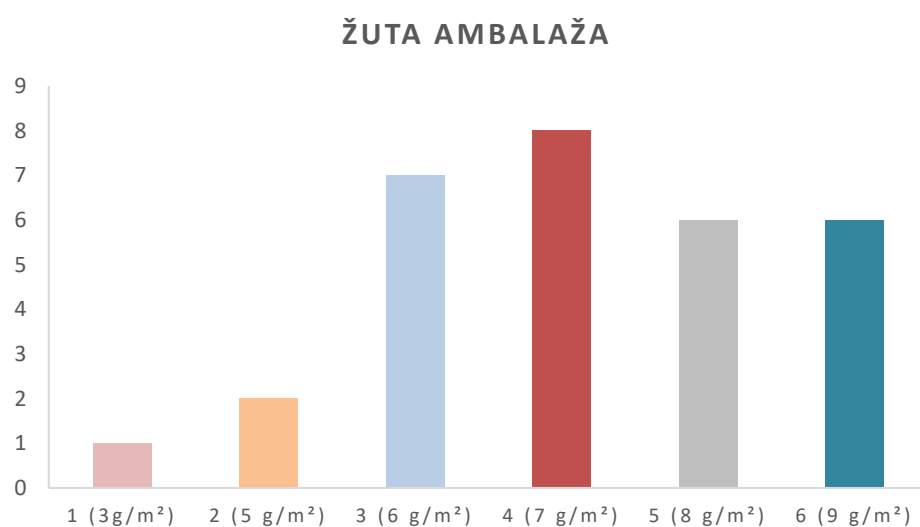
Slika 73. Vizualna ocjena kvalitete reprodukcije za bijelu ambalažu



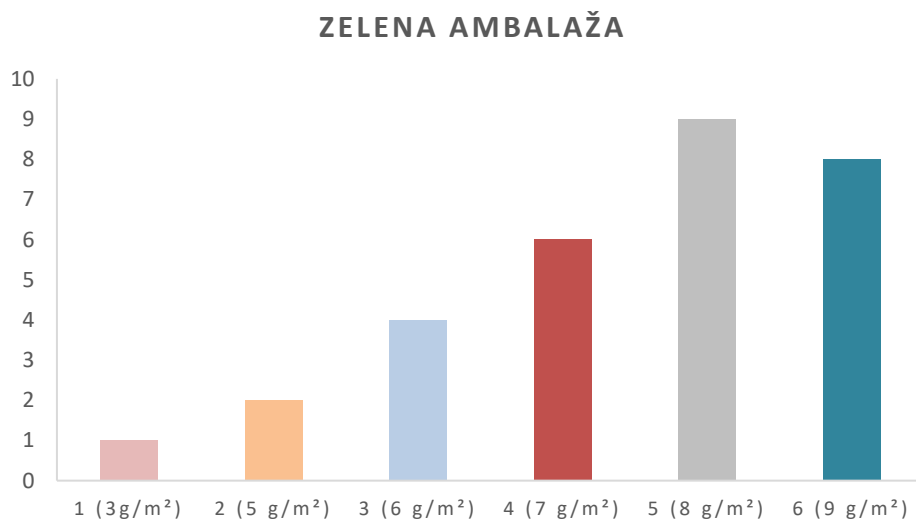
Slika 74. Vizualna ocjena kvalitete reprodukcije za crvenu ambalažu



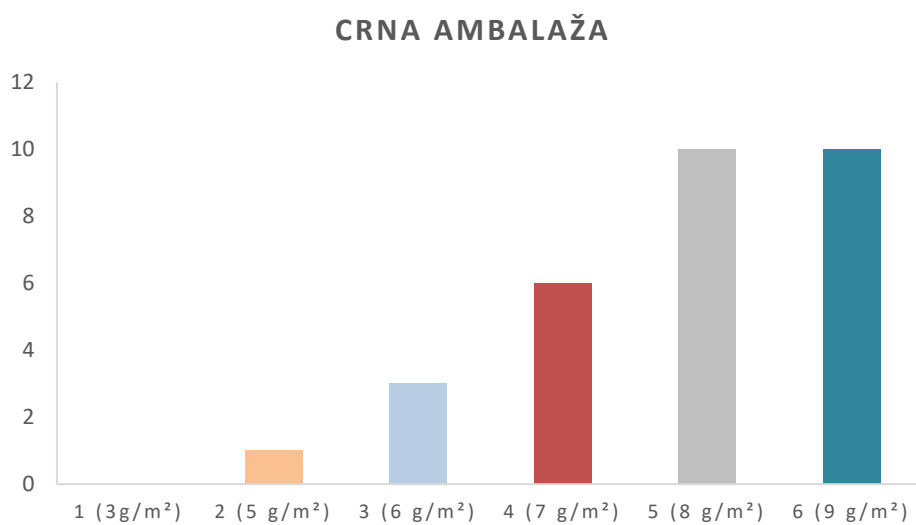
Slika 75. Vizualna ocjena kvalitete reprodukcije za plavu ambalažu



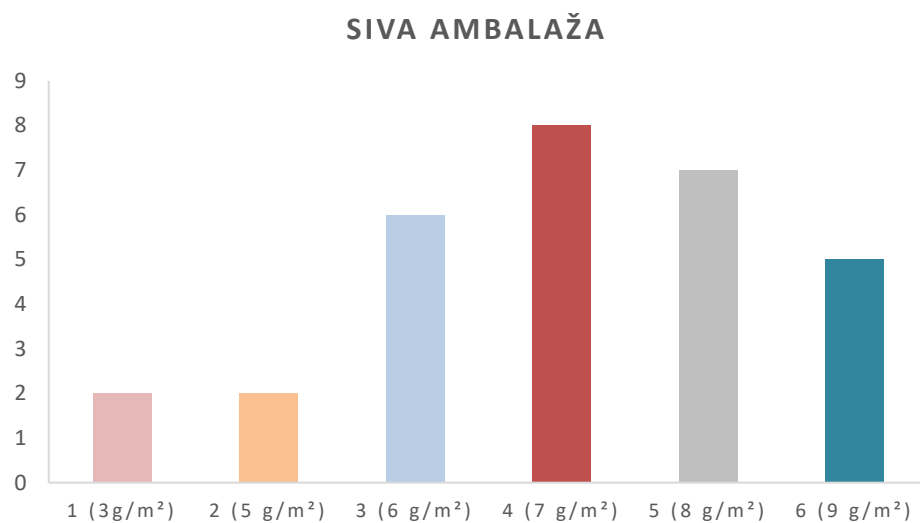
Slika 76. Vizualna ocjena kvalitete reprodukcije za žutu ambalažu



Slika 77. Vizualna ocjena kvalitete reprodukcije za zelenu ambalažu

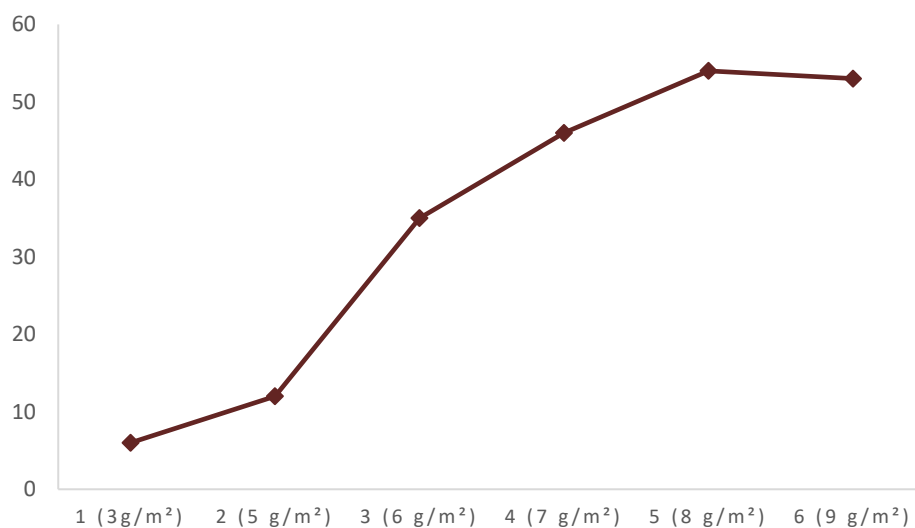


Slika 78. Vizualna ocjena kvalitete reprodukcije za crnu ambalažu



Slika 79. Vizualna ocjena kvalitete reprodukcije za sivu ambalažu

Nakon dobivenih rezultata suma vrijednosti po svakom uzorku se zbrojila i prikazana je linearnim grafikonom na (slici 80.).



Slika 80. Grafički prikaz rezultata ukupnog vrednovanja kvalitete reprodukcije za uzorke od 1 – 6.

3.3. Diskusija rezultata istraživanja

Cilj ovog eksperimentalnog istraživanja je statistički obraditi i pravilno prikazati rezultate mjerenja dobivenih određenim metodama u svrhu što kvalitetnije reprodukcije kolorimetrijskih vrijednosti u korelaciji sa nesmetanim nanošenjem termoskupljajuće etikete na poluproizvod (tvrdu ambalažu). Tako se na tiskovnoj formi nalaze svi potrebni elementi za objektivnu i subjektivnu kontrolu kvalitete otisnutog materijala iz kojih su dobiveni rezultati o kvaliteti.

3.3.1. Koeficijent frikcije (COF) mjerenja

Kako bi se definirala ukupna kvaliteta kod termoskupljajućih etiketa prvo se mjerio koeficijent frikcije kod različitih nanosa klizne bijele boje o kojem ovisi nesmetana implementacija etikete na tvrdu ambalažu. Kliznost se mjerila na uzorcima od 6 različitih gramatura nanosa klizne bijele boje pomoću uređaja SST3-XS, RDM po 20 mjerenja za svaku gramaturu.

Prvi rezultati definirali su se kroz srednju vrijednost dobivenih mjerenja za $n=20$. Rezultati su dali podatke da je njihova prava vrijednost za \bar{x} pokazala za Uzorak 1 i Uzorak 3 gotovo iste rezultate srednje vrijednosti od 0,164 i 0,161. Nešto niži koeficijent frikcije pokazuju Uzorak 2 i Uzorak 4 koji iznosi 0,155 i 0,159. Uzorci 5 i Uzorak 6 pokazuju veće koeficijente frikcije od 0,171 do 0,176.

Nakon dobivene srednje vrijednosti računala se standardna devijacija rezultata kako bi se vidjelo koliko dobiveni rezultati odstupaju od prosjeka, odnosno koliko su nam podaci bliski. Pa tako ako je standardna devijacija mala, aritmetička sredina dobro predstavlja rezultate. Standardna devijacija za Uzorak 3 i Uzorak 4 je ista i iznosi 0,008. Kod Uzorka 2 izračun pokazuje najveću standardnu devijaciju od 0,012, dok nam Uzorak 1 pokazuje najmanju standardnu devijaciju od 0,005. Uzorci 5 i 6 također imaju istu standardnu devijaciju od 0,007. Kada se dobila izračunom standardna devijacija računala se i standardna varijacija. Standardna varijacija ili relativno standardno odstupanje koje se dobilo tako da se standardna devijacija podijelila sa aritmetičkom sredinom srednje vrijednosti te se rezultat množio sa 100%. Za niz od $n=20$ mjerenja prosječno odstupanje vrijednosti od aritmetičke sredine za Uzorak 1 i Uzorak 6 iznosi 3,04% i 3,97%, dok najveći koeficijent varijacije dobiven je na Uzorku 2 i iznosi 7,74%. Kod Uzoraka 3, 4 i 5 koeficijent varijacije iznosi približno isto od 4,09% do 5,03%.

Na kraju se kroz srednju vrijednost standardne pogreške prikazalo koliko su dobiveni rezultati pouzdani. U ovom slučaju statistički rezultati pokazuju vrlo malu mogućnost pogreške kod svih dobivenih mjerenja na Uzorcima od 1 do 6 unutar intervala 0,0011 do 0,0027. Kod Uzorka 5 i Uzorka 6 dobiven je isti rezultat standardne pogreške od 0,0016. Najveće odstupanje ima Uzorak 2 od 0,0027 dok najmanje od 0,0011 ima Uzorak 1. Preostala dva Uzorka 3,4 imaju skoro iste vrijednosti pogreške od 0,0017 i 0,0018.

Prema dobivenim rezultatima kroz mjerenja i analizu dobivenih rezultata za koeficijent kliznosti različitih naosa bijele klizne boje može se vidjeti da nema velikih razlika između Uzoraka 1-6. i u konačnici pokazuju vrlo malu skoro nikakvu mogućnost standardne pogreške.

3.3.2. Prirast RTV mjerenja

U ovom istraživanju na uzorcima je izmjeren prirast rastertonskih vrijednosti na poljima od 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% i 90% za cijan boju, te je mjereno puno polje na 100 %. Uzorci su mjereni na različitim bojama ambalaže koja najčešće dolazi kao poluproizvod u realnoj proizvodnji. Od dobivenih točaka izrađena je krivulja prirasta RTV i grafički prikazana. Iz rezultata krivulje prirasta rastertonske vrijednosti vidljivo je kako otisci Uzoraka od 1 do 6 sa različitim nanosom klizne bijele boje vrlo malo variraju. Sva CMYK bojila kod nižih rastertonskih vrijednosti bilježe veće povećanje, nakon čega slijedi smanjenje rastertonskih vrijednosti.

Kod mjerenja prirasta na bijeloj ambalaži najveći prirast RTV pokazuju Uzorak 1 i Uzorak 2 koji ujedno imaju i najmanji nanos klizne bijele boje od 3 g/m² i 5 g/m². Njihov najveći prirast rastertonskih vrijednosti je na 40%. Ostali uzorci su vrlo slični i vrlo malo variraju u međuo odnosu.

Mjerenje uzoraka na crvenoj ambalaži pokazuje nagli rast rastertonskih vrijednosti do 10% gdje je prirast rastertonske vrijednosti ujedno i najveći kod krivulja svih uzoraka na crvenoj ambalaži. I na ovoj boji ambalaže uzorci 1 i 2 pokazuju najveći prirast dok uzorak 6 ima najmanji prirast rastertonskih vrijednosti do 35%.

Prirast rastertonskih vrijednost na plavoj ambalaži također pokazuje nagli rast prirasta rastertonskih vrijednosti na 5% sve do 10%. Na mjerenom polju od 10% prirast RTV je preko 55% za uzorke 1 i 2, svi ostali uzorci prikazuju prirast RTV između 40% i 50% . Najmanji prirast imaju uzorak 5 i 6 koji su skoro istih vrijednosti.

Najveća razlika u odstupanju se može vidjeti mjerenjima koja su dobivena na žutoj ambalaži. Ovdje Uzorak 1 drastično odstupa od ostalih uzoraka na 10% RTV i iznosi preko 40% prirasta

dok su ostali uzorci podjednaki i svi su ispod 27% . Uzorak 1 pokazuje nagli pad pa je na mjerenom polju od 20% RTV već čak ispod 32%, te na 50% RTV opet vidimo nešto viši prirast preko 32%. Ostali uzorci su podjednaki i njihov najveći prirast vidimo na polju od 40% RTV gdje je prirast na 30%.

Na zelenoj ambalaži mjerenja pokazuju prirast rastertonskih vrijednosti za Uzorke od 3, 4, 5 i 6 najvećim na RTV polju od 10% i iznose između 40% i 50% prirasta RTV. Nešto veći prirast imaju Uzorci 1 i 2 preko 50% prirasta RTV na mjernom polju od 10%, nakon kojeg svi uzorci imaju pad prema većim mjernim poljima, te nakon polja od 70% svi se nalaze na istoj razini.

Uzorci na crnoj ambalaži pokazuju također najveći prirast na polju od 10% RTV, gdje je on najmanji za uzorak 6 i prirast RTV iznosi 41%, a za uzorak 2 prirast je najveći u istom polju RTV i iznosi 58%. Krivulje svih uzoraka pokazuju pad prema većim RTV vrijednostima.

Kod sive ambalaže vrijednosti se slično ponašaju te nakon prirasta koji je za sve uzorke najveći u polju od 10% RTV, spuštaju se naglo i ulaze u istu točku na višim poljima od 70% RTV i dalje. Najveći prirast rastertonskih vrijednosti imaju i ovdje uzorci 1 i 2, dok uzorak 6 ima najmanji prirast. Uzorci 3, 4 i 5 su podjednakih vrijednosti.

3.3.3. Gamut reprodukcije mjerenja

Da bi se mogle određivati vrijednosti gamuta kao produkt reprodukcije boja, izrađen je dokument sa poljima za gamut. Polja za gamut su otisnuta na PVC materijalu od šest različitih uzoraka, koji se razlikuju po gramaturi nanosa bijele klizne boje. Varijacije dobivenog gamuta reprodukcije radile su se na različitim bojama ambalaže kroz CIE $L^*a^*b^*$ sustav za procesne boje CMYK. Razlike boje se uočavaju promatranjem dvodimenzionalnih prikaza s obzirom na veličinu zasićenosti boja. Te L^* os odnosno svjetlinu boje kao zaseban parametar kako bi se kvalitetnije uočile razlike.

Prvi graf pokazuje prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz CIE $L^*a^*b^*$ sustava za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na bijeloj ambalaži. Kod cijan boje na bijeloj ambalaži uzorci pokazuju vrlo malu raspršenost gdje uzorak 5 i 6 su nešto zasićeniji od ostalih uzoraka. Uzorci 1 i 2 su najmanje zasićeni. Na L^* osi svi uzorci pokazuju slične vrijednosti od kojih je uzorak 1 nešto svijetliji od ostalih uzoraka. Magenta boja pokazuje veću raspršenost rezultata na b^* osi kromatičnosti koja se kreće od 40 do 80. Uzorak 1 također pokazuje najveću svjetlinu na L^* osi. Kod žute boje uzorci sa različitim nanosima boje po a^* osi vrlo malo odstupaju jedan od drugoga i uzorak 1 je najmanje zasićen. Dok je razlika u tonu boje nešto malo veća i uzorci 1 i 2 pokazuju da idu prema zelenoj boji. Svi uzorci su jednake svjetline od 86,2 do 86,6 po L^* osi.

Kod crne boje uzorci su grupirani unutar užeg intervala, a malo veću vrijednost od 2 pokazuje Uzorak 3. Također je uzorak 3 kod crne boje najsvjetliji po L^* osi na bijeloj ambalaži.

Prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz CIE $L^*a^*b^*$ sustav za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na crvenoj ambalaži. Na grafu za cijan boju vidi se da uzorak 6 ide više prema plavoj boji i nešto je zasićeniji od ostalih uzoraka. Uzorak 1 pokazuje najniže vrijednosti u odnosu na ostale uzorke. Najveću svjetlinu pokazuje uzorak 6, dok uzorci 1 i 2 idu prema tamnijem području na L^* osi. Kod magente svi uzorci pokazuju istu ili sličnu vrijednost na a^* osi i idu malo prema plavoj boji, ali se nalaze blizu osi a^* i b^* . Najveću svjetlinu pokazuje uzorak 6, dok uzorci 1 i 4 pokazuju nižu vrijednost i idu prema tamnijem. Uzorci 3 i 5 pokazuju srednju vrijednost unutar međudnosa od 42 do 43 na L^* osi. Kod uzoraka za žutu boju na crvenoj ambalaži vidi se da uzorci 3 i 4 imaju iste vrijednosti na a osi, dok uzorak 1 i 2 odstupa na a^* osi prema većim vrijednostima, a na b^* osi prema nižim vrijednostima u odnosu na druge uzorke. Više vrijednosti na L^* osi pokazuje uzorak 6, a niže vrijednosti pokazuju uzorci 1 i 2. Kod crne boje uzorci 2, 3, 4, 5 i 6 pokazuju približne vrijednosti vrlo blizu sredine osi a^* i b^* , dok se uzorak 1 izdvojio i ima još niže vrijednosti u odnosu na druge uzorke po a^* i b^* osi. Veću vrijednost od ostalih po L^* osi pokazuje Uzorak 3 i on je najsvjetliji.

Prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz CIE Lab sustav za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na plavoj ambalaži. Za cijan boju dobiven je rezultat po b^* osi podjednakih vrijednosti za sve uzorke, dok po a^* osi uzorak 1 pokazuje najnižu vrijednost -26,78, a uzorak 6 pokazuje najvišu vrijednost -30,89. Prema L^* osi najsvjetliji je otisak na uzorku 6. Kod magente uzorci su grupirani unutar intervala 40 – 60 po a^* osi, na b^* osi najmanje odstupanje od osi pokazuje uzorak 5, a najveće uzorak 1. Također najveća svjetlina vidi se na uzorku 6, a najmanja na uzorku 1, iza kojeg su odmah uzorak 2 i 4 po L^* osi. Za žutu boju uzorci 3, 4, 5 i 6 pokazuju gotovo iste vrijednosti po a^* osi, uzorak 1 i 2 su izdvojeni prema zelenim tonovima. Dok po b osi kreću se uzorci od 1 do 6 od nižih vrijednosti 70, do najviše vrijednosti za uzorak 6 od 81. Raspon svjetline na L^* osi je isti i kreće se za sve uzorke od 86,2 do 86,6. Kod mjerenja crne boje uzorak 1 odstupa od drugih na obje osi a^* i b^* u minus. Uzorak 2 je po b osi u minusu ali po a^* osi u plusu vrlo blizu nule. Uzorci 3, 4, 5 i 6 se nalaze unutar vrijednosti 0,1 do 0,8 po b^* osi. Najsvjetliji je Uzorak 3, a najmanju svjetlinu pokazuju uzorci 2 i 4 na plavoj ambalaži po osi L^* .

Prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz CIE $L^*a^*b^*$ sustav za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na žutoj ambalaži. Kod cijana uzorci 1 i 2 kreću se prema zelenim tonovima. Uzorci 3 i 4 pokazuju srednje vrijednosti u međudnosu točaka uzoraka. Po L^* osi najveću svjetlinu ima uzorak 6, a najnižu svjetlinu ima uzorak 2. Za magentu uzorci od 1 do 5 su

grupirani na a^* i b^* osi i idu više u crveno, a uzorak 6 se izdvaja i ide prema žutom tonu. Prema L^* osi vidimo da su uzorci također grupirani u vrijednosti između 46 i 46,5, a uzorak 4 se ističe ispod 4 vrijednosti. Kod žute boje na žutoj ambalaži svi uzorci pokazuju skoro iste vrijednosti i po a^* i po b^* osi, ističu se uzorak 1 koji se pomaknuo samo po b^* osi od ostalih uzoraka i pokazuje puno nižu vrijednost od 12, dok su ostali na 95. Uzorak 2 se izdvojio i po a^* i po b^* osi prema crvenom tonu. Uzorak 2 pokazuje najnižu svjetlinu na L^* osi na vrijednosti od 45 i izdvojio se od ostalih uzoraka koji su grupirani na L^* osi iznad 80. Kod crne boje na žutoj ambalaži izdvojio se uzorak 1 koji je pomaknut prema žutom tonu dok su ostali uzorci grupirani uz osi a^* i b^* također uzorak 1 pokazuje puno nižu svjetlinu od ostalih uzoraka koji su grupirani između 13 i 16 po L^* osi.

Prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz CIE $L^*a^*b^*$ sustav za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na zelenoj ambalaži. U ovom grafu za cijan boju rezultati pokazuju kako se uzorak 6 izdvaja i više je zasićen od ostali uzoraka te se kreće prema plavom tonu, dok su ostali uzorci na a osi sa vrijednošću od 34,7 do 35,2. Najbliži b^* osi je uzorak 1 na -41,2, dok su ostali uzorci od -42,5 do -45,42. Na L^* osi najveću vrijednost za svjetlinu ima Uzorak 6, dok uzorci 1 i 2 imaju najmanju vrijednost na L^* osi te su nešto tamniji. Kod magente svi uzorci se nalaze u vrijednosti od 40 do 60 na a osi. Vidi se iz rezultata kako uzorak 5 ide prema žutom tonu, dok uzorak 1 i 2 idu prema ljubičastom tonu. Na zelenoj ambalaži višu vrijednost pokazuje uzorak 6 od 40,55 dok uzorak 1 pokazuje najnižu vrijednost svjetline na L^* osi 35,80. Žuta boja kod otisaka pokazuje da uzorak 1 ide prema zelenom tonu dok uzorci 5 i 6 idu prema žutom tonu. Od žutog prema zelenom idu redom uzorci 5, 4 i 3. Na L^* osi se vidi da najveću svjetlinu ima uzorak 6, zatim uzorak 5 na 73, uzorak 4 i 3 na 71, a tamniji su uzorak 2 na 69, te uzorak 1 na 68 za vrijednosti na L^* osi za zelenu ambalažu. Uzorak 3 ulazi više u žuti ton, dok se ostali uzorci usmjereni prema sredini osi. Najniže vrijednosti a^* i b^* osi pokazuju uzorak 1 i 2. Prema mjerenjima najsvjetliji je uzorak 3 čija je vrijednost 15, a najtamniji je uzorak 4 sa vrijednošću od 12,29. Ostali uzorci se nalaze unutar tih vrijednosti na L^* osi.

Prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz CIE $L^*a^*b^*$ sustav za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na crnoj ambalaži. Uzorak 6 najviše ide prema plavom tonu od svih uzoraka za cijan boju. Najnižu vrijednost po a^* osi ima uzorak 1. Najveću svjetlinu pokazuje uzorak 6, zatim uzorak 5. Za uzorak 3 dobivena je veća svjetlina od uzorka 4. Najmanju vrijednost imaju uzorak 2 i 1 koji su tako i najtamniji po L^* osi. Za magentu uzorak 1 ide prema plavom tonu, dok su ostali uzorci a najviše uzorak 5 bliže a^* i b^* osi. Na L^* osi najveću svjetlinu pokazuje uzorak 6, a najmanju uzorak 2 na 36, a uzorak 1 još manju na 35,26. Kod žute Uzorci su grupirani po b^* osi od 70 do 80, dok su na a^* osi skoro pa preklapaju na istim vrijednostima.

Najmanju svjetlinu ima uzorak 1, pa redom do najveće svjetline ima uzorak 6 na L^* osi. Kod crne boje Uzorak 1 i 2 po b^* osi imaju minus vrijednosti od -0,34 i -0,19, dok svi ostali uzorci po b^* osi kreću se od 0,30 do 0,80 koju vrijednost imaju uzorak 4 i uzorak 5. Na L^* osi najmanju svjetlinu pokazuje uzorak 4 od 12,24, a najsvjetliji je uzorak 3 sa vrijednosti 14,86 po L^* osi za crnu podlogu.

Prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz CIE $L^*a^*b^*$ sustav za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na sivoj ambalaži. Uzorak 6 i uzorak 4 prema b^* osi pokazuju nešto bliže vrijednosti prema plavo-ljubičastom tonu, dok za uzorke 1 i 3 dobivene su vrijednosti od -30,47 do -30,94. Najveću vrijednost po L^* osi od 46,11 pokazuje uzorak 6, a svi ostali uzorci grupirani su na nižim vrijednostima na L^* osi od 42,68 za uzorak 2 do 43,85 za uzorak 4. Kod magenta boje otiak na sivoj ambalaži pokazuje da su uzorci od 1 do 4 grupirani na vrlo sličnim vrijednostima i po a^* i po b^* osi dijagrama kromatičnosti i idu prema žutom tonu. Ističu se uzorak 5 i 6 koji se nalaze na manjim vrijednostima. Uzorak 6 po L^* osi je puno svjetliji i nalazi se na 41,25, dok su svi ostali uzorci grupirani od 37,71 do 38,14. Uzorci 1, 2 i 3 prema dijagramu na a^* i b^* osi idu prema narančastom tonu, dok uzorci 4, 5 i 6 po a^* osi pokazuju vrijednosti od -7,69 do -7,72 koje su bliže nuli na osi a^* . Najveću svjetlinu od 75,13 pokazuje uzorak 6, a najmanju uzorak 1 od 70,04. Kod crne boje uzorci 1, 2, 3 i 4 po b^* osi pokazuju približno jednake vrijednosti od 0,09 do 0,13. Dok se uzorci 5 i 6 izdvajaju i idu prema žutom tonu sa vrijednostima 0,70 i 0,86. Na L^* osi vidi se da najveću svjetlinu pokazuju rezultati za uzorak 5 i 6 preko 14, dok su ostali uzorci ispod 13,5 vrijednosti na L^* osi dijagrama za crnu boju na sivoj ambalaži.

3.3.4. Opacitet mjerenja

Opacitet je mjera za nepropusnost svjetla, te se mjerila spektrofotometrom. Njime se mjeri reflektirana svjetlost sa podloge, podlaganjem papira. Na opacitet utječe više faktora, a neki su vrsta materijala, stupanj bojila, premazi. U ovom istraživanju korišteni materijal je PVC od 45 μm koji je polimerni materijal i transparentan je. Zbog prozirnosti materijala te kako bi se pojačao kontrast bojila tiska se dodatno bijela boja koja kod termoskupljajućih etiketa ima dvije važne funkcije. Jedna je bolja reprodukcija i kvalitetniji otisak, a druga je optimalna količina bijele boje radi svoje kliznosti kada se nanosi na tvdu ambalažu. Dobiveni rezultati prikazani su kroz tablicu i linearnim grafom u poglavlju 3.2.4.

Mjerenja su rađena na crnoj podlozi, za različite nanose klizne bijele boje od 3 g/m^2 , 5 g/m^2 , 6 g/m^2 , 7 g/m^2 , 8 g/m^2 i 9 g/m^2 . Uzorci su definirani brojevima od 1 do 6.

Dobiveni rezultati pokazuju kako se neprozirnost linearno kreće od Uzorka 1 koji ima opacitet 48,2 do Uzorka 6 čiji opacitet iznosi 63,6. Približnu vrijednost unutar ranije navedenih graničnih vrijednosti imaju uzorak 4 koji ima 58,2 vrijednost opaciteta i uzorak 5 za koji je dobiveno 60,6. Uzorak 2 ima približnu vrijednost kao prvi uzorak od 50,1 te je za uzorak 3 dobiven rezultat od 55,2 za vrijednost opaciteta. Najveća razlika vidi se između uzorka 2 i uzorka 3 od čak 5,1, dok je razlika od uzorka do uzorka za ostale materijale do 3.

3.3.5. Optimalni sivi balans mjerenja

Optimalni sivi balans mjerio se na poljima CMY i K sa preporučenim udjelima za svaku boju unutar mjernog polja na kontrolnom stripu. Na slikama od 60. do 65. prikazane su kolorimetrijske vrijednosti za CMY polje za različite nanose bijele klizne boje i na različitim bojama ambalaže. Na slikama od 66. do 71. prikazane su kolorimetrijske vrijednosti za CMY polje te koleracija sa K poljem i njihov odnos za različite nanose klizne boje na različitim bojama ambalaže. Nakon čega se računao ΔE koji je dobiven Euclideanovom razlikom za optimalni sivi balans između CMY i K polja.

Promatrajući točke kolorimetrijskih vrijednosti za CMY i K polja kod uzorka 1 gdje je nanos klizne bijele boje 3 g/m² i njihovog međusobnog odnosa može se vidjeti kako uzorci na plavoj i na crnoj podlozi pokazuju slične vrijednosti dok uzorak na crvenoj i zelenoj ambalaži pokazuju prilično različite vrijednosti. Uzorci na bijeloj i žutoj pokazuju slične vrijednosti dok je uzorak na žutoj podlozi malo svijetliji. Za mjerenje optimalnog sivog balansa ΔE dobiveni su rezultati za sve podloge ambalaže preko 3. Za uzorak 1 na crnoj ambalaži i na crvenoj ambalaži ΔE je najniži 3,02. Dok na je na bijeloj ambalaži za optimalni sivi balans ΔE najveći i iznosi 3,65.

Kolorimetrijske vrijednosti za polja CMY i K za uzorak 2 kod kojega je nanos klizne bijele boje 5 g/m² pokazuju za vrijednosti na bijeloj i žutoj ambalaži slične, također slične vrijednosti pokazuju točke za uzorke na plavoj i crnoj ambalaži. Uzorak na zelenoj ambalaži pokazuje nešto veće odstupanje od ostalih. U koleraciji sa K poljem vidimo da je otisak na bijeloj ambalaži za K nešto svijetliji, isto tako i uzorak na žutoj ambalaži je svijetliji za K polje od CMY polja. Za optimalni sivi balans ΔE pokazuje za uzorak 2 na plavoj i na crnoj ambalaži

2,84 i 2,80. Dobiveni ΔE za druge podloge je veći ali podjednak iznad 3. Dok je za uzorak 2 na žutoj podlozi najveći od 3,94.

Kod izmjerenih vrijednosti za uzorak 3 gdje je nanos bijele klizne boje 6 g/m² na različitim bojama ambalaže može se vidjeti kako Uzorci na bijeloj i žutoj podlozi nešto više odstupaju od ostalih gdje uzorci na crvenoj, zelenoj i sivoj zauzimaju srednje vrijednosti a uzorci na plavoj i crnoj imaju niže vrijednosti od ostalih. U korelaciji za K poljem vidimo da su uzorci na tom polju zasićeniji i kreću se prema nižim vrijednostima po b osi, a po a osi pokazuju veće vrijednosti od polja CMY. Za dobiveni ΔE kod uzorka 3 između polja CMY i polja K na svim bojama podloga dobivene su slične vrijednosti preko 2,50. najoptimalniji je uzorak 3 na crvenoj podlozi koji pokazuje vrijednost 2,53, dok najveću vrijednost pokazuje uzorak 3 na bijeloj ambalaži od 3,12.

Uzorak 4 na kojem je klizna bijela boja nanešena 7 g/m² pokazuje vrijednosti za uzorke na crnoj i plavoj podlozi sličnih vrijednosti, dok uzorci na sivoj i zelenoj podlozi pokazuju veće vrijednosti po b osi i nešto su svjetliji. Malo veće odstupanje po a osi pokazuje uzorak 4 na crvenoj podlozi. A uzorci na bijeloj i žutoj podlozi su najsvjetliji. U međuo odnosu CMY polja sa K poljem dobilo se da svi uzorci za K polje pokazuju veće vrijednosti po a osi od polja CMY. Kod uzorka 4 za optimalni sivi balans ΔE vidimo najveće odstupanje za bijelu podlogu koje iznosi 3,22. Uzorak na ostalim podlogama pokazuje vrlo slične vrijednosti od 2,80 do 2,97.

Kolorimetrijske vrijednosti razlike boja između polja CMY i K za Uzorak 5. kod kojeg nanos klizne bijele boje iznosi 8 g/m² vidi se najveća grupiranost točaka prema boji ambalaže od svih uzoraka od 1 – 6. Svi uzorci pokazuju veću svjetlinu od kojih su uzorci 5 na bijeloj i žutoj ambalaži najsvjetliji. Jedini odstupanje pokazuje uzorak 5 za K polje mjeren na crvenoj podlozi. Odstupanje je veliko za razliku od ostalih točaka i to po L* osi gdje je u minus vrijednosti, dok su sve ostale točke u plus vrijednosti iznad 30. Također kod mjerenja optimalnog sivog balansa i dobivenog ΔE najveće je odstupanje za uzorak 5 na crvenoj podlozi koji iznosi 9,46. Ostale vrijednosti između polja CMY i K za uzorak 5 pokazuju slične vrijednosti za plavu, žutu, zelenu, crnu i sivu podlogu od 2,75 do 2,91. Dok je ΔE za uzorak 5 na bijeloj podlozi 3,06.

Uzorak 6 na kojem je nanos bijele klizne boje 9 g/m² po različitim podlogama ambalaže za CMY i K polja dobivene vrijednosti pokazuju kako su uzorci na bijeloj i žutoj podlozi ambalaže najsvjetliji, dok uzorci na sivoj i zelenoj podlozi ambalaže pokazuju srednje vrijednosti. Uzorak na crvenoj podlozi pokazuje veće vrijednosti po a osi od ostalih uzoraka, dok su uzorci na plavoj i crnoj podlozi najnižih vrijednosti po L* osi. U koleraciji CMY i K polja svi uzorci 5 za K polje pokazuju veće vrijednosti po a osi u odnosu na vrijednosti dobivene za CMY polje.

Jedino kod uzorka 6 optimalni sivi balans ΔE je za sve podloge ambalaže ispod 3. Najvišu dobivenu vrijednost ima uzorak 6 na bijeloj podlozi ambalaže od 2,94. Ostali uzorci kreću se u rasponu od 2,59 do 2,76 za ΔE optimalni sivi balans.

3.3.6. Subjektivna metoda istraživanja

Subjektivna metoda istraživanja provela se na 30 ispitanika vizualnom metodom. Iz rezultata koji su dobiveni može se vidjeti na grafu od 73 do 79 kako rezultati pokazuju da su prihvatljive vrijednosti za vizualnu kvalitetu kreću od uzorka 3 do uzorka 6, ovisno o podlozi na kojoj su gledani. Za uzorak 1 gdje je nanešena bijela klizna boja od 3 g/m² vidi se da je ocijenjen kao najlošiji, odnosno više puta nije odabran. Uzorak 2 gdje je nanos bijele klizne boje bio 5 g/m² pokazuje nešto bolje rezultate od uzorka 1, ali također je jednako loš kod vizualnog odabira promatrača. Velika razlika je između uzorka 2 i uzorka 3, tako da uzorak 3 pokazuje zadovoljavajući vizualni odabir i otprilike je između svih uzoraka u sredini po vrijednosti. Nadalje, uzorak 4 gdje je nanos klizne bijele boje 7 g/m² pokazuje rezultat od 46 odabranika što je nešto veće od uzorka 3 gdje je nanos klizne bijele boje 6 g/m². Najbolji rezultat kroz vizualnu metodu dobiven je kod uzorka 5 gdje je nanos klizne bijele boje 8 g/m². Uzorak 6 također pokazuje visoki rezultat u odabiru ukupnog vrednovanja kvalitete reprodukcije na različitim podlogama boje ambalaže.

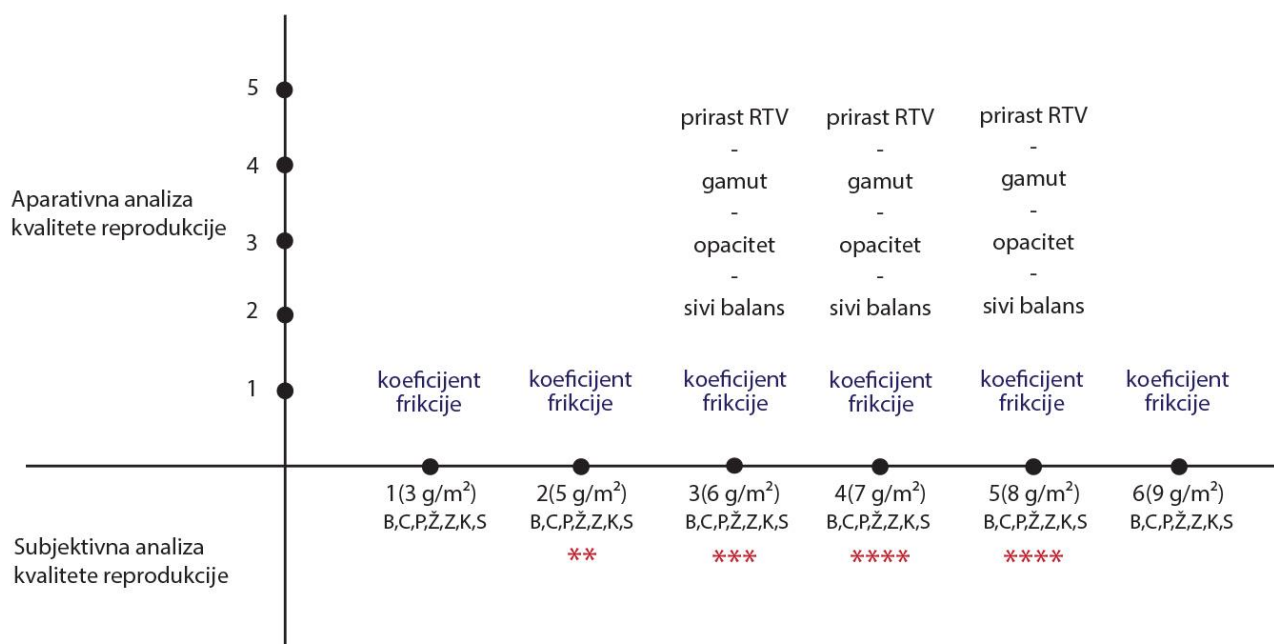
Vizualno vrednovanje ukupne kvalitete reprodukcije naklade prikazano je na (slici 80.). Uzorak 5 je ocijenjen sa najboljom ukupnom kvalitetom reprodukcije. S vrlo dobrom/dobrom ukupnom kvalitetom reprodukcije ocijenjeni su uzorci 6, 4 i 3, a sa lošom/najlošijom ukupnom kvalitetom reprodukcije ocijenjeni su uzorci 2 i 1, koji imaju i najmanju gramaturu nanosa bijele klizne boje.

3.3.7. Uspredba objektivnih i subjektivnih rezultata

Veza objektivne i subjektivne procjene izražena je korelacijskom analizom dobivenih rezultata, a to dodatno potvrđuje vrijednost rezultata na temelju kojih je izrađen model istraživanja. Varijable izmjerene u svrhu objektivne procjene bile su vrijednosti kliznosti bijele boje i vrijednosti parametara kvalitete reprodukcije uvjetovane vrstom tiskovnog bojila, tiskovnom podlogom te sveukupnim parametrima i uvjetima prilikom otiskivanja. Mjeren je prirast RTV, optimalni sivi balans, opacitet i gamut reprodukcije na mjernim poljima izrađenim na tiskovnoj

formi i otisnutim na uzorcima termoskupljajućih etiketa. Usporedbom rezultata dobivenih aparativnim mjerenjem i subjektivne procjene uočljivosti kvalitete reprodukcije koja je uključivala prikaz boja, prikaz svijetlih tonova, prikaz tamnih tonova, kvaliteta tonova (ravnomjeran prijelaz boje), kvaliteta i oštine linije i vrednovana je od najboljeg do najlošijeg dobiven je koeficijent korelacije prikazan na (slici 81.).

Na (slici 81.) može se vidjeti dobiveni rezultat subjektivne analize kvalitete reprodukcije ispod osi koja je prikazana pomoću zvjezdica. Broj zvjezdica od manjeg prema većem pokazuje i kvalitetu reprodukcije, uzorak sa više zvjezdica se pokazao kvalitetniji. Paralelno je prikazano i aparativno mjerenje



Slika 81. Pregled rezultata dobivenih aparativnim i subjektivnim analizama na različitim bojama ambalaže

3.4. Zaključci

Istraživanje kroz ovu doktorsku disertaciju i cilj aktivnosti u radu bio je definirati i proučiti u kolikoj mjeri dolazi do kolorimetrijskih promjena te subjektivne procjene kvalitete kod reproduciranja procesnih boja kod nanošenja različitih gustoća obojenja klizne bijele boje na različitim bojama ambaleže te razjasnilo na koji način dolazi do istih. Definirale su se granične vrijednosti koeficijenta frikcije bijele boje te kvalitete tiska koje mogu utjecati na promjene reproduciranih boja te u skladu s rezultatima istraživanja donijele preporuke kod korištenja raznovrsnih postupaka procesa izrade termoskupljajućih etiketa.

Eksperimentalni dio istraživačkog rada podjeljen je u tri dijela. U prvom dijelu aparativno se definirao koeficijent frikcije kod različitih nanosa klizne bijele boje. Evaluirala se kliznost materijala na gotove otiske dobivene fleksografskim tiskom procesnih boja. Na otiske se nanosila klizna pokrivna bijela boja u različitim gustoćama obojenja. Navedenim promjenama u nanosu bijele boje dobile su se različite kliznosti materijala pri čemu su se ustanovile granične, ali i optimalne vrijednosti kliznosti kako bi proces nanošenja termoskupljajućih etiketa tekao nesmetano u direktnoj proizvodnji.

U drugom dijelu ispitivao se aparativno utjecaj četiri specifične varijable na kvalitetu reprodukcije. Polja za mjerenje sadržavala su elemente kojima se definirala gustoća obojenja procesnih tiskarskih boja te polja za određivanje gamuta reprodukcije. Isto tako, na otiscima od polimernog materijala nalazila su se polja za kontrolu prirasta gustoće obojenja u deset jednakih intervala te uz ta polja bila su definirana polja za kontrolu raspona gustoće obojenja u vrijednostima koje su standardizirane za fleksografski tisak. Za ustanovljavanje kolorimetrijskih vrijednosti otiskivanja u dijelu sivih tonova na tiskovnoj formi nalazila su se i polja za kontrolu sivog balansa te opaciteta termoskupljajućih etiketa.

I na kraju se provela subjektivna procjena kvalitete tiska na višebojnim reprodukcijama metodom binokularnog simultanog usuglašavanja tako da su se promatrati otisci koji su tiskani na različitim vrijednostima gustoće obojenja klizne bijele boje odabirali od najboljeg do najlošijeg. Navedenom metodom ustanovile su se male promjene u kvaliteti doživljaja reprodukcija koje su ovisile o kolorimetrijskim promjenama uslijed interakcije s različitim vrijednostima gustoće obojenja klizne bijele boje i različitim bojama ambalaže.

Na svim otiscima termoskupljajućih etiketa sa različim nanosima klizne bijele boje mjerio se koeficijent frikcije kliznosti koji pokazuje da je kliznost za sve otiske prihvatljiva. Kliznosti se od uzorka 1 do uzorka 6 kreću unutar vrijednosti koje zadovoljavaju nesmetanu proceduru

nanosa termoskupljajućih etiketa na poluproizvod, odnosno tvrdi ambalažu kreću u zadanim vrijednostima. Ovo istraživanje je usmjereno prema optimalnoj kvaliteti procesa proizvodnje ambalaže kako bi se zadovoljili svi preduvjeti implementiranja na poluproizvod kod sliviranja, te kako bi se izbjegle poteškoće i mogući zastoji na samom stroju za sliviranje.

Istraživanja koja su provedena laboratorijskim mjerenjem kolorimetrijskih promjena tristimulusnih vrijednosti reflektiranih boja. Rezultati su pokazali da uzorci za sve nanose bijele klizne boje pokazuju skoro jednake vrijednosti na različitim podlogama ambalaže. Tako na bijeloj ambalaži pokazuju najmanji prirast RTV, dok na ostalim bojama ambalaža prirast je veći na nižim vrijednostima od 10%. Najveći prirast je na žutoj ambalaži i to posebno za uzorak 1 koji ima najmanji nanos gramature klizne bijele boje. Za gamut reprodukcije možemo zaključiti kako su uzorci 1 i 6 granični uzorci jer pokazuju granične vrijednosti za CMYK na svim bojama podloga ambalaže. Uzorak jedan pokazuje veću zasićenost i tamniju reprodukciju boja, dok uzorak 6 pokazuje izrazito svijetle tonove. Kod mjerenja opaciteta krivulja se kreće linearno što je uvjetovano debljinom nanosa klizne bijele boje, pa su tako pokazali i rezultati da se opacitet kreće od najnižeg za uzorak 1 koji je najtransparentniji do uzorka 6 koji pokazuje najmanju prozirnost. Može se zaključiti da su uzorci u sredini 2,3,4 i 5 zadovoljavajući. Kod optimalnog sivog balansa dobivene vrijednosti $\Delta E > 2$. Razlike između CMY polja i K polja najveće su za uzorak 1 i to na svim bojama ambalaže. Dok svi uzorci pokazuju nešto veću razliku mjereni na bijeloj ambalaži $\Delta E > 3$ i crvenoj ambalaži za uzorke 1, 2 i 5.

Vizualnim analizama ispitivana je ukupna kvaliteta reprodukcije i može se zaključiti kako su uzorci 1 i 2 na granici i dobili su najmanje bodova ispitanika. Uzorak 6 pokazuje vrlo dobre rezultate ali zbog ukupnog prevelikog nanosa boje i bijele klizne boje potencijalno je problematičan kod prijanjanja na ambalažu nakon sliviranja. Uzorci 3, 4 i 5 pokazuju najbolje rezultate ispitanika i ocijenjeni su kao vrlo dobri i odlični. Detaljnije možemo zaključiti kako uzorci sa nižim gramaturama nanosa bijele klizne boje mogu zadovoljiti na bijeloj i sivoj ambalaži dok na ostalim ambalažama pokazuju priličnu razliku od uzoraka sa većim nanosom bijele klizne boje. Te se razlike najviše vide na ambalaži crvene, zelene i crne boje.

Zaključno prema (slici 81.) može se reći da odabir optimalnih parametara u konačnici uvelike ovisi o samom dizajnu termoskupljajuće etikete jer se boje i tonovi različito reflektiraju na različitim podlogama ambalaže. U ovom istraživačkom radu uzele su se podloge ambalaže koje su najčešće u realnoj proizvodnji i u korelaciji sa svim parametrima dobile su se granične vrijednosti za proširenje upotrebe u fleksotisku kod termoskupljajućih etiketa.

Znanstveni doprinos

Pretpostavljene hipoteze istraživanja su dokazane kroz empirijski dio istraživanja te je ostvaren znanstveni doprinos na temelju potpune komparativne analize elemenata važnih za konačan optimalan gotovi proizvod.

Znanstveni doprinos ove disertacije se očituje u znanstvenim spoznajama:

1. Doprinos standardizaciji grafičke tehnologije u području kvalitete fleksografskog tiska kod primjene bojila na polimernim materijalima za izradu termoskupljajućih etiketa.
2. Proširenje upotrebe preporučenih vrijednosti koeficijenta frikcije i konačne kvalitete otiskivanja na polimernim materijalima.
3. Definiranje graničnih vrijednosti koje utječu na kvalitetu tiska prilikom upotrebe procesnih boja u korelaciji s kliznom bijelom bojom kod termoskupljajućih etiketa

Završno, rezultati istraživanja mogu se koristiti kao preporuka za ostvarivanje optimalnih rezultata prilikom tiska termoskupljajućih etiketa te je određenim metodama odabira pravilnih parametara moguće povezati kvalitetu reprodukcije gotovog proizvoda, koja uvelike pridonosi u području uštede troškova i resursa, te marketinga i ekologije. Izneseni rezultati i analiza kao završetak ovog istraživačkog rada nikako ne predstavljaju kraj istraživanja na ovome području, već potiču daljnja istraživanja i nove spoznaje na području fleksotiska, etiketa na polimernim materijalima i ambalaže.

4. LITERATURA

- [1] Kipphan, H. (2001), Handbook of Print Media, Springer, ISBN 978-3-540-67326-2, Berlin
- [2] Bohlin, E. (2013), Surface and porous structure of pigment coatings - Interactions with flexographic ink and effects on print quality, Dissertation, Karlstad University Studies; ISBN 978-91-7063-528-1
- [3] Caner, E.; Farnood, R. & Yan, N. (2008), Effect of the Coating Formulation on the Gloss Properties of Coated Papers, Pulp & Paper Centre, University of Toronto, Toronto
- [4] Zjakic, I. (2007), Managing the Quality of Offset Printing, Croatian University Press, ISBN 9789531691451, Zagreb
- [5] Gong, M., Pedersen, M. (2012), Spatial pooling for measuring color printing quality attributes, Journal of Visual Communication and Image Representation, Vol. 23, Issue 5, 2012, p. 685–696
- [6] Cui L. C. (2004), Do experts and naive observers judge printing quality differently, Image Quality and System Performance, San Jose, California; January, p. 132-145; ISBN/ISSN: 0-8194-5197-5
- [7] Berns R. S. (2000), Principles of Color Technology, John Wiley&Sons, USA
- [8] Leon K.; Mery D.; Pedreschi F.; Leon J. (2006) Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images, Food Research International, (39), p. 1084-1091
- [9] Frank J. R. (Ed) (1998) GATF Encyclopedia of Graphic Communications, GATFPRESS, Pittsburgh
- [10] M. Černič Lentar, A. Hladnik, V. Kropar Vančina (2003), Optical and colour stability of graphic paperboards and prints, ACTA GRAPH. 15, 1, p. 13-24
- [11] Frey M., Clement F., Dilfer S., Erath D., Biro D. (2011), Front-side Metalization By Means Of Flexographic Printing, Energy Procedia 8, p. 581–586
- [12] Lorenz A., Senne A., Rohde J. (2015), Evaluation of Flexographic Printing Technology for Multy-Busbar Solar Cells, Energy Procedia 67, p. 126-137
- [13] Valdec D. (2013), Utjecaj promjenjivih parametara fleksotiska na geometriju rasterskog elementa predostisnute tiskovne podloge, Doktorski rad, Zagreb
- [14] Repeta V., Kukura Y. (2016), Quantitative evaluation of quality of flexographic imprints by means of fuzzy logic, Acta Graphica Vol 27, No 1; p. 39-46
- [15] Selke S.E., Hernandez R.J. (2016), Packaging: Polymers in Flexible Packaging, Encyclopedia of Materials, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.

- [16] Mensitieri G., Scherillo G., Iannace S. (2013), Flexible packaging structures for high pressure treatments, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Volume 17, p. 12-21
- [17] Galić K., Ciković N., Berković K. (2000), *Analiza ambalažnog materijala*, Sveučilište u Zagrebu.
- [18] Sekhar J. (2018), Tunable Coefficient of friction with surface texturing in materials engineering and biological systems, *Current Opinion in Chemical Engineering*.
- [19] Pavlović Ž.; Novaković D.; Cigula T. (2012), Wear analysis of the offset printing plates non – printing areas depending on exploitation. *Technical Gazette* 19, 3, p. 543-548
- [20] Barry A. Morris (2017), *The Science and Technology of Flexible Packaging, Multilayer Films from Resin and Process to End Use*, A volume in *Plastics Design Library*, p. 69–119
- [21] Dunn T. (2015), *Manufacturing Flexible Packaging: Materials, Machinery, and Techniques*, p. 28-37
- [22] Izdebska J., Sabu T. (2015), *Printing on Polymers*.
- [23] Hunt R. W. G.(1991), *Measuring color*, Ellis Horwood Limited, England
- [24] Ghosh, Arabinda. "Manufacturing of Polymer Packaging". *Technology of Polymer Packaging* 2015. Pages 19-81. ISBN:978-1-56990-576-0.
- [25] Bolanča, Stanislav. "Tisak ambalaže". Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb 2013. ISBN:978-953-169-252-6
- [26] Vujković, Ivan; Galić, Kata; Vereš, Martin. "Ambalaža za pakiranje namirnica", Tectus, Zagreb 2007. ISBN: 978-953-97026-9-2
- [27] Raos P., Šercer M., *Teorijske osnove proizvodnje polimernih tvorevina*, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Osijek, 2010.
- [28] Stipanelov Vrandečić N., *Ambalaža – interna skripta*, Zavod za organsku tehnologiju, kemijsko tehnološki fakultet, Sveučilište u Splitu, 2010.
- [29] <http://www.ecocortec.hr/docs/prezentacije/Clanak-AMBALAZA.pdf>
- [30] Guneri Akovali., *Plastics, Rubber and Health*, Smithers Rapra Technology Limited, Shawbury, 2007.
- [31] Čatić, I., Šercer, M.: *Proizvodnja polimernih tvorevina*, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 2004.
- [32] Beswick H.D. Richard, Dunn J.David, *Plastics in Packaging*, Rapra Technology Limited, Shawbury, August 2002.
- [33] Hernandez J.Ruben, Selke E.M. Susan, Culter D. John, *Plastics Packaging: Properties*,

Processing, Applications and Regulations, Hanser Publishers, Munich, 2000.

[34] Rujnić-Sokele M., Izradba ambalaže od poli(etilen-tereftalata) te njezina uporaba i primjena u prehrambenoj industriji, *Polimeri*, 24(2003)2-4, pp. 87-94.

[35] Raj Baldev, Matche, R.S. "Safety and regulatory aspects of plastics as food packaging materials", *Multifunctional and Nanoreinforced Polymers for Food Packaging*, 2011., Pages 669-691. ISBN: 978-1-84569-738-9.

[36] C. Kittel, W. D. Knight, M. A. Rudermann, *Mehanika*, Tehnička knjiga, Zagreb 2003.

[37] Mesaroš, Franjo. "Grafička enciklopedija", Tehnička knjiga, Zagreb

[38] ISO 8295:1995. Plastic – Film and sheeting – Determination of the coefficient of friction, European standard.

[39] Marušić Vlatko., "Tribologija u teoriji i praksi", Slavonski brod, 2008.

[40] Pino, A., Pladellorens, J., Measure of Roughness of Paper Using Speckle, *Proc. of SPIE* Vol. 7432, 74320E, 2009.

[41] Kajanto, I., Laamanen, J. & Kainulainen, M., Paper bulk and surface, *Paper Physics*. K. Niskanen, Helsinki, Fapet Oy. 16, pp. 89-115, 1998.

[42] *Flexographic Principles and Practices*, 4th edition, (1991) Foundation of Flexographic Technical Association, Inc., Ronkonkoma, NY

[43] Cusdin, G., (1999), What is Flexography?, *Flexographic Principles and Practices*, Foundation of Flexographic Technical Association, New York, pp.3-18

[44] Valdec, D., Miljković, P., Auguštin, B., The influence of printing substrate properties on color characterization in flexography according to the iso specifications, *Tehnički glasnik*, 2017, 73-77.

[45] Bould D. C.; Claypole T. C.; Bohan M. F. J., »An experimental investigation into flexographic printing plates«, *Journal of Graphic Technolog*, svez. 3, br. 1, pp. 1-8, 2004.

[46] Flexographic Technical Association (FTA), *Flexography: Principles & Practices*, New York: Foundation of Flexographic Technical Association, Inc., 1999.

[47] Hamblyn, S.M., (2004), The Role of the Plate in the Ink Transfer Process in Flexographic Printing, Ph.D. thesis, University of Wales Swansea

[48] Horvatić Stjepan., "Fleksotisak tisak ambalaže", Donja Lomnica: Grafika Maekulin 2011. ISBN 9789536406265

[49] Lanska D.; Cellramic S., »Stork Sheds Light on UV Inks«, *Converting Magazine*, svez. 15, br. 6, 1997.

[50] Miller C. W., »Perspectives in chemistry: Searching for the cure«, *RadTech Report*, br. 4, p. 52–58, 2005.

- [51] Fairley, M., (2004), Encyclopedia of Label and Label Technology ,Tarsus Publishing Ltd, London
- [52] Anyadike, N., (2003), Introduction to Flexible Packaging, Pira International Ltd, Surrey
- [53] CIE No. 15.2. Colorimetry, Commision Internationale de l'Eclairage, Vienna, Austria, 1986.
- [54] Fraser, B., Murphy, C., Bunting, F., Real World Color Management, Second Edition, Peachpit Press, Berkley, ISBN 0-321-26722-2, 2005.
- [55] Milković, M., Zjakić, I., Kozina, G., Kolorimetrija u multimedijским komunikacijama, Veleučilište u Varaždinu, Varaždin, 2010.
- [56] Sharma, G., Digital Color Imaging Handbook, CRC Press, 2003.
- [57] Zjakić, I., Milković, M., Psihologija boja, Varaždin 2010.
- [58] ASTM, 2018. Standard Test Method for Static and Kinetic Coefficients of Friction of Plastic Film and Sheeting, ASTM International.
- [59] Pauše Ž., 1993. Uvod u matematičku statistiku. Školska knjiga, Zagreb.
- [60] McHugh ML., Standard error: meaning and interpretation, University of Indianapolis, Indianapolis, Indiana, USA, Biochemia Medica 2008;18(1):7–13
- [61] Gustavson, S., (1997) Dot Gain in Colour Halftones, Ph. D. Thesis., Linköping University
- [62] Bould D. C.; Claypole T. C.; Bohan M. F. J.; Gethin D. T., »Deformation of lexographic Printing Plates«, u 56th TAGA Technical Conference, TAGA, 2004.
- [63] Lee, B.-K., Shyu, L.-S., Chang, S.-L., Lui, Y.-T., (1996), Estimation of the Neugebauer model of a halfone printer and its application/OSA/OII, Joint Symposium on Digital Color Printing, Rochester
- [64] Braun, G.J., Fairchild, M.D., (1999), Gamut Mapping for pictorial images, TAGA Proceedings, 9, pp.420-432
- [65] Zjakić, I., (2005.), Optimalizacija sustava rastertonske reprodukcije u tisku, Doktorska disertacija, Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb
- [66] Breede, M.H.; (2006), Testing the validity of measuring gray balance with the GATF Color Circle, Grayness and Hue Error Values, TAGA Proceeding, pp.292-314
- [67] Field, G. G. (1999), Color and its reproduction 2 edition., GAFTPress, Sewickley

5. POPIS SLIKA I TABLICA

Slika 1. Razgranatost makromolekula a. linearna b. razgranati c. umreženi	13
Slika 2. Primjena polimerne ambalaže	14
Slika 3. Kemijska struktura polietilena	16
Slika 4. Primjer ambalaže od polietilena.....	16
Slika 5. Vreće od PE-LD folije	17
Slika 6. Etikete od polipropilena (PP) <i>Izvor: Grafplex d.o.o</i>	18
Slika 7. Poliesterska folija.....	20
Slika 8. Kemijska struktura polivinil klorida	22
Slika 9. Termoskupljajuće etikete (Shreenk sleeve) od PVC materijala	23
Slika 10. Aluminijska folija	25
Slika 11. Metalizirani polimerni material	25
Slika 12. Lokalni kontakti strojno obrađenih površina	27
Slika 13. Djelovanja sila na tijelo za vrijeme a) statičkog mirovanja b) gibanja.....	29
Slika 14. Trenje kotrljanja a) otpor pri kotrljanju b) pokus trenja kotrljanja	30
Slika 15. Trenje klizanja.....	31
Slika 16. Ovisnost faktora trenja o normalnom opterećenju.....	32
Slika 17. Faze procesa klizanja	33
Slika 18. Elementi obrađene fotopolimerne tiskovne ploče.....	36
Slika 19. Sustav za obojenje sa dva valjka s klasičnim rakelom/nožem.....	37
Slika 20. Sustav za obojenje sa komorom za boju i sistemom rakela.....	38
Slika 21. Stvrdnjavanje bojila pod snopom zračenja	39
Slika 22. Djelovanje UV lampe na flekso tiskarskom stroju	40
Slika 23. Primjena termoskupljajućih etiketa na ambalaži	42
Slika 24. Karakteristika boje	43

Slika 25. Ton boje	43
Slika 26. Zasićenje	43
Slika 27. Svjetlina	43
Slika 28. Prikaz spektrofotometrijske krivulje s obzirom na različito obojene objekte.....	45
Slika 29. Najatraktivnije boje na ambalaži.....	46
Slika 30. Shema metodologije i plan istraživanja	49
Slika 31. Krivulje skupljanja PVC filma mjereno u vodi nakon 15 sekundi °C	50
Slika 32. Nilpeter FA 4, <i>Izvor: Grafplex d.o.o</i>	52
Slika 33. Upravljačka centralna konzola stroja Nilpeter FA 4, <i>Izvor: Grafplex d.o.o</i>	52
Slika 34. Kamera za kontrolu tiska, <i>Izvor: Grafplex d.o.o</i>	52
Slika 35. Mjerni uređaj X-Rite eXact.....	54
Slika 36. Uređaj za mjerenje koeficijenta frikcije materijala SST3-XS, RDM	54
Slika 37. Tiskovna forma za provedbu istraživanja	55
Slika 38. Sliviranje plastične ambalaže termoskupljajućom etiketom	56
Slika 39. Grafički prikaz rezultata srednje vrijednosti klizne bijele boje i standardna devijacija za COF za uzorke od 1-6.....	59
Slika 40. Grafički prikaz rezultata koeficijenta varijacije za koeficijent frikcije za uzorke od 1-6.	59
Slika 41. Grafički prikaz rezultata standardne pogreške srednje vrijednosti za koeficijent frikcije za uzorke od 1-6.	60
Slika 42. Kontrolni strip za definiranje prirasta rastertonske vrijednosti i deformacije rasterskog elementa	62
Slika 43. Prirast rastertonske vrijednosti kod različitih nanosta klizne bijele boje na bijeloj ambalaži	62
Slika 44. Prirast rastertonske vrijednosti kod različitih nanosta klizne bijele boje na crvenoj ambalaži	63
Slika 45. Prirast rastertonske vrijednosti kod različitih nanosta klizne bijele boje na plavoj ambalaži	63
Slika 46. Prirast rastertonske vrijednosti kod različitih nanosta klizne bijele boje na žutoj ambalaži	64

Slika 47. Prirast rastertonske vrijednosti kod različitih nanosta klizne bijele boje na zelenoj ambalaži	64
Slika 48. Prirast rastertonske vrijednosti kod različitih nanosta klizne bijele boje na crnoj ambalaži	65
Slika 49. Prirast rastertonske vrijednosti kod različitih nanosta klizne bijele boje na sivoj ambalaži	65
Slika 50. Prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz CIE Lab sustav za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na bijeloj ambalaži	68
Slika 51. Prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz CIE Lab sustav za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na crvenoj ambalaži	69
Slika 52. Prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz CIE Lab sustav za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na plavoj ambalaži	70
Slika 53. Prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz CIE Lab sustav za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na žutoj ambalaži	71
Slika 54. Prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz CIE Lab sustav za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na zelenoj ambalaži	72
Slika 55. Prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz CIE Lab sustav za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na crnoj ambalaži	73
Slika 56. Prikaz usporedbe gamuta reprodukcije kroz CIE Lab sustav za CMYK različitih nanosa bijele klizne boje na sivoj ambalaži	74
Slika 57. Prikaz načina mjerenja opaciteta sa Spektrofotometrom	76
Slika 58. Graf prikazuje vrijednosti opaciteta za šest različitih debljina nanosa bijele boje ...	76
Slika 59. Kontrolni strip za određivanje optimalnog sivog balansa	77
Slika 60. Kolorimetrijske razlike boja za polje CMY između različitih boja podloge ambalaže za Uzorak 1.	78
Slika 61. Kolorimetrijske razlike boja za polje CMY između različitih boja podloge ambalaže za Uzorak 2.	79
Slika 62. Kolorimetrijske razlike boja za polje CMY između različitih boja podloge ambalaže za Uzorak 3.	79
Slika 63. Kolorimetrijske razlike boja za polje CMY između različitih boja podloge ambalaže za Uzorak 4.	80

Slika 64. Kolorimetrijske razlike boja za polje CMY između različitih boja podloge ambalaže za Uzorak 5.	80
Slika 65. Kolorimetrijske razlike boja za polje CMY između različitih boja podloge ambalaže za Uzorak 6.	81
Slika 66. Usporedba kolorimetrijskih razlika boja između polja CMY i K za Uzorak 1.....	81
Slika 67. Usporedba kolorimetrijskih razlika boja između polja CMY i K za Uzorak 2.....	82
Slika 68. Usporedba kolorimetrijskih razlika boja između polja CMY i K za Uzorak 3.....	82
Slika 69. Usporedba kolorimetrijskih razlika boja između polja CMY i K za Uzorak 4.....	83
Slika 70. Usporedba kolorimetrijskih razlika boja između polja CMY i K za Uzorak 5.....	83
Slika 71. Usporedba kolorimetrijskih razlika boja između polja CMY i K za Uzorak 6.	84
Slika 72. Grafički prikaz ΔE za polja CMY i K iz tablice 14.	85
Slika 73. Vizualna ocjena kvalitete reprodukcije za bijelu ambalažu	87
Slika 74. Vizualna ocjena kvalitete reprodukcije za crvenu ambalažu	87
Slika 75. Vizualna ocjena kvalitete reprodukcije za plavu ambalažu	88
Slika 76. Vizualna ocjena kvalitete reprodukcije za žuta ambalažu	88
Slika 77. Vizualna ocjena kvalitete reprodukcije za zelenu ambalažu	89
Slika 78. Vizualna ocjena kvalitete reprodukcije za crnu ambalažu	89
Slika 79. Vizualna ocjena kvalitete reprodukcije za sivu ambalažu	90
Slika 80. Grafički prikaz rezultata ukupnog vrednovanja kvalitete reprodukcije za uzorke od 1 – 6.	90
Slika 81. Pregled rezultata dobivenih aparativnim i subjektivnim analizama na različitim bojama ambalaže	100

Tablica 1. Najčešće korištene vrste papira kod fleksibilne ambalaže	12
Tablica 2. Vrste polimera i njihove ponavljane jedinice	13
Tablica 3. Važnija fizička svojstva poli(etilen-tereftalata) (PET)	19
Tablica 4. Tehničke specifikacije polimernog materijala PVC	50

Tablica 5. Karakteristike 'UV bojila'	51
Tablica 6. Karakteristike osnovne stroja Nilpeter FA 4	53
Tablica 7. Osnovne tehničke karakteristike uređaja X-Rite eXact	53
Tablica 8. Legenda tablica eksperimentalnog rada	55
Tablica 9. Podatci srednje vrijednosti koeficijenta frikcije (COF), standardnu devijaciju i koeficijenta varijacije	57
Tablica 10. Podatci srednje vrijednosti standardne pogreške (SE)	58
Tablica 11. Legenda kartica izmjerenih vrijednosti prikazanih grafovima.....	67
Tablica 12. Definiranje šest različitih debljina nanosa bijele klizne boje na polimernom materijalu.....	75
Tablica 13. Rastertonske vrijednosti (%) polja na kontrolnom stripu	78
Tablica 14. Prikazuje kolorimetrijske razlike ΔE za polja CMY i K kod uzoraka od 1 do 6. .	84
Tablica 15. Način vrednovanja ukupne vizualne kvalitete reprodukcije	86

Životopis i popis objavljenih radova

Ivana Ljevak, mag. ing. graph. tech. rođena je 27. 06. 1979 u Zagrebu. Nakon završetka III. matematičke gimnazije upisuje se na Sveučilište u Zagrebu na Grafički fakultet gdje stiče titulu magistre inženjerke grafičke tehnologije.

Tijekom studija zapošljava se u tvrtki Badel 1862 d.d. proizvođaču alkoholnih pića u Zagrebu. Doktorski studij grafičkog inženjerstva i oblikovanja grafičkih proizvoda započela je 2013. godine. Od 2018 godine prelazi u marketing tvrtke Meteor Grupa – Labud d.o.o. tvornici sredstava za pranje, kozmetičkih i kemijskih proizvoda u Zagrebu.

Objavila je više znanstvenih radova te sudjelovala na međunarodnim konferencijama. Njezini znanstveno istraživački interesi uključuju područja promjene kolorimetrije boja različitih valnih duljina uslijed tiskarskih procesa, te matematičke analize. Tijekom dokorskog studija uključena je u projekte s industrijom, osobito na razvoju novih rješenja svakodnevnih problema te njihovom primjenom u proizvodnom sektoru.

Popis radova i aktivnih sudjelovanja na znanstvenim skupovima:

1. Ljevak, Ivana ; Pugar, Daniel ; Ptiček, Petra; Zjakić Igor

Elementi optimalnog vizualnog doživljaja potrošača polimerne ambalaže kod sredstava za čišćenje // *Book of abstracts BLAŽ BAROMIĆ 2019* / Mikota, Miroslav (ur.). ZAGREB, 2019. str. 54-54 (predavanje, domaća recenzija, sažetak, znanstveni)

2. Ljevak Ivana; Galić Eduard; Zjakić Igor

Label reproduction quality on different machine constructions // *20th International Conference on Materials MATRIB 2019* / Šolić, Sanja ; Schauperl, Zdravko ; Pugar, Daniel (ur.). Zagreb: HDMT - Croatian Society for Materials and Tribology, 2019. 110, 4 (poster, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

3. Ljevak, Ivana; Zjakić, Igor; Banić Dubravko

The variability of dynamic coefficient of friction material in flexible packaging // *Acta graphica* 25 (2018) , 3-4 (2018); 83-90 (prethodno priopćenje, znanstveni).

2. Ljevak Ivana; Ptiček Petra; Zjakić Igor

Kolirimetrija spotnih boja kod termoskupljajućih etiketa pod utjecajem podložne klizne bijele boje // *Blaž Baromić 2018*, Senj, Hrvatska, 2018 (Znanstveni skupovi i radionice, Predavanje)

4. Ljevak, Ivana; Zjakić, Igor

Analiza kvalitativnih parametara reprodukcije na polimernim materijalima // *Blaž Baromić 2017*, Senj, Hrvatska, 2017 (Znanstveni skupovi i radionice, Predavanje)

5. Ljevak, Ivana; Galić, Eduard; Zjakić, Igor

Interakcija UV boje i podloge UV sušenjem kod rotacijskog inline ofsetnog tiska // *Blaž Baromić 2016*, Senj, Hrvatska, 2016 (Znanstveni skupovi i radionice, Poster)

6. Zjakić Igor; Ljevak Ivana; Bogdanović Siniša

Deformacija tonaliteta kod višebojnog otiskivanja na tekstil // *9 th Scientific-professional symposium textile science and economy*, Zagreb, Hrvatska, 2016 (zbornik radova)

7. Galić, Eduard; Ljevak, Ivana; Zjakić, Igor.

The Effect of Thermal Lamination Processes on Colorimetric Change in Spot Colours // *Acta graphica. 25 (2015)* , 3-4 (2014); 83-90 (prethodno priopćenje, znanstveni).

8. Ljevak Ivana; Galić Eduard; Zjakić Igor

Studija standardizacije reprodukcije fleksotiskarskog procesa na različitim tiskovnim podlogama // *Blaž Baromić 2015*, Senj, Hrvatska, 2015 (Znanstveni skupovi i radionice, Poster)

9. Galić, Eduard; Ljevak, Ivana; Zjakić, Igor

Korelacija malih subjektivno-objektivnih kvalitativnih razlika u tisku // *Blaž Baromić 2014*, Senj, Hrvatska, 2014 (Znanstveni skupovi i radionice, Poster)

10. Galić, Eduard; Ljevak, Ivana; Zjakić, Igor

The Influence of UV Varnish on Colorimetric Properties of Spot Colors // *Proceedings of 25th DAAAM International Symposium Vienna*, Austrija, 2014 (Znanstveni skupovi i radionice, Poster)

11. Galić, Eduard; Ljevak, Ivana; Zjakić, Igor

Utjecaj različitih metoda lakiranja na sjajnost premaznih i nepremaznih tiskovnih podloga //

Blaž Baromić 2014, Senj, Hrvatska, 2014 (Znanstveni skupovi i radionice, Poster)